

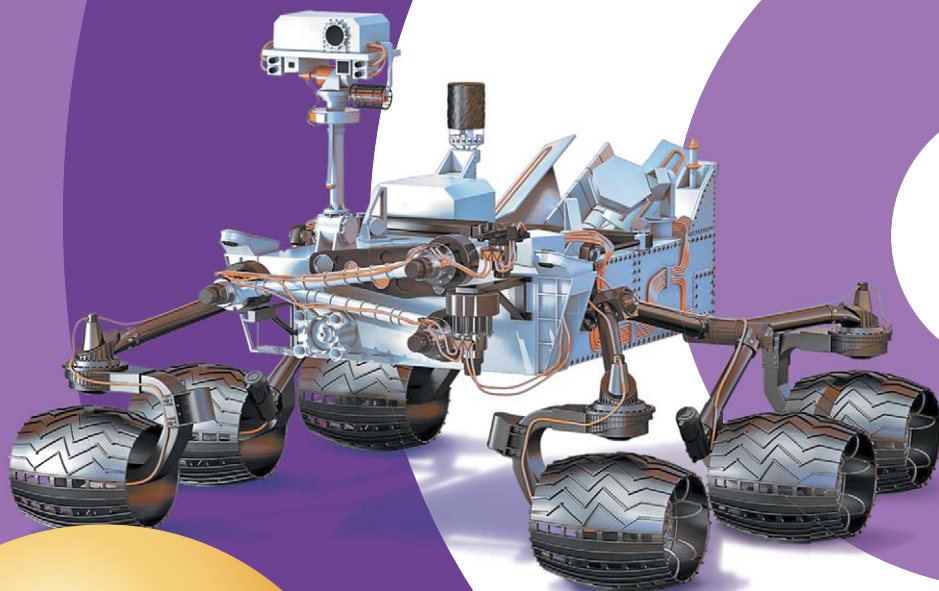


В. В. Белага
И. А. Ломаченков
Ю. А. Панебратцев



ФИЗИКА

ФИЗИКА



10

БАЗОВЫЙ
УРОВЕНЬ



**В. В. Белага
И. А. Ломаченков
Ю. А. Панебратцев**

ФИЗИКА

10 класс

Базовый уровень

Учебник

Допущено
Министерством просвещения
Российской Федерации

4-е издание, стереотипное

Москва
«Просвещение»
2022



УДК 373.167.1:53+53(075.3)
ББК 22.3я721
Б43

Серия «Сферы» основана в 2003 году

Получены **положительные** заключения **научной** (заключение РАО № 1175 от 18.11.2016 г.), **педагогической** (заключение РАО № 1066 от 21.11.2016 г.) и **общественной** (заключение РКС № 442-ОЭ от 22.12.2016 г.) экспертиз.

Издание выходит в pdf-формате.

Белага, Виктория Владимировна.

Б43 Физика : 10-й класс : базовый уровень : учебник : издание в pdf-формате / В.В. Белага, И.А. Ломаченков, Ю.А. Панебратцев. — 4-е изд., стер. — Москва : Просвещение, 2022. — 223, [1] с. : ил. — (Сферы).

ISBN 978-5-09-101619-2 (электр. изд.). — Текст : электронный.

ISBN 978-5-09-095832-5 (печ. изд.).

Данный учебник продолжает линию учебно-методических комплексов «Сферы» по физике. Издание подготовлено в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта среднего общего образования. Материал учебника направлен на формирование научных представлений о физических законах и явлениях и основывается на достижениях современной физики и техники. Главными особенностями данного учебника являются фиксированный в тематических разворотах формат, лаконичность и жёсткая структурированность текста, разнообразный иллюстративный ряд.

УДК 373.167.1:53+53(075.3)
ББК 22.3я721

ISBN 978-5-09-101619-2 (электр. изд.)
ISBN 978-5-09-095832-5 (печ. изд.)

© АО «Издательство «Просвещение», 2019
© Художественное оформление.
АО «Издательство «Просвещение», 2019
Все права защищены

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
----------------	---

РАЗДЕЛ I. МЕХАНИКА

Механика как фундамент современной картины мира	7
--	---

Глава 1. КИНЕМАТИКА

1. Пространство и время	10
2. Механическое движение	12
3. Способы описания движения тела	14
4. Равномерное прямолинейное движение	16
5. Классический закон сложения скоростей	18
6. Неравномерное движение	20
7. Равнопеременное прямолинейное движение	22
8. Движение с ускорением свободного падения	26
9. Движение по окружности	30
Решение задач	32
Подведём итоги	34

Глава 2. ДИНАМИКА

10. Сила. Измерение сил	36
11. Инерция. Первый закон Ньютона	38
12. Взаимосвязь силы и ускорения. Второй закон Ньютона	40
13. Взаимодействие тел. Третий закон Ньютона	42
14. Закон всемирного тяготения	44
15. Движение под действием силы тяготения	46
16. Вес тела	48
17. Сила трения	50
Решение задач	52
Подведём итоги	54

Глава 3. СТАТИКА

18. Условия равновесия невращающегося тела	56
19. Равновесие тел с закреплённой осью вращения. Устойчивость равновесия	58
Решение задач	60
Подведём итоги	62

Глава 4. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ

20. Механическая работа	64
21. Мощность	66
22. Энергия	68
23. Потенциальная энергия	70
24. Кинетическая энергия	72
25. Закон сохранения энергии. Относительность механической энергии	74
26. Работа сил трения и механическая энергия	76
27. Импульс	78
28. Закон сохранения импульса	80
29. Реактивное движение	82
Решение задач	84
Подведём итоги	86

РАЗДЕЛ II. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Атом — от гипотезы Демокрита до таблицы Менделеева ..	87
---	----

Глава 5. ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

30. Основные положения молекулярно- кинетической теории	90
--	----



31. Основная цель молекулярно-кинетической теории	94
32. Количество вещества. Молярная масса	96
33. Строение газообразных, жидких и твёрдых тел	98
34. Идеальный газ. Давление газа. Средняя скорость движения молекул газа	100
35. Основное уравнение молекулярно- кинетической теории	102
36. Экспериментальное определение скорости движения молекул. Опыт Штерна	104
37. Температура. Тепловое равновесие. Термометры	106
38. Изопроцессы. Закон Гей-Люссака. Абсолютная температура	108
39. Закон Бойля–Мариотта. Закон Шарля	110
40. Уравнение состояния идеального газа	112
41. Температура и средняя кинетическая энергия молекул	114
Решение задач	116
Подведём итоги	118

Глава 6. ВЗАИМНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ГАЗОВ, ЖИДКОСТЕЙ И ТВЁРДЫХ ТЕЛ

42. Агрегатные состояния вещества	120
43. Испарение. Насыщенный и ненасыщенный пар. Кипение	122
44. Влажность	124
45. Кристаллические и аморфные тела	126
Подведём итоги	128

РАЗДЕЛ III. ВВЕДЕНИЕ В ТЕРМОДИНАМИКУ

От паровой машины до реактивного двигателя	129
--	-----

Глава 7. ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

46. Внутренняя энергия	132
47. Количество теплоты	134
48. Работа в термодинамике	136
49. Первый закон термодинамики	138
50. Второй закон термодинамики	140
51. Тепловые двигатели	142
Решение задач	144
Подведём итоги	146

РАЗДЕЛ IV. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

Мир электрических явлений	147
-------------------------------------	-----

Глава 8. ЭЛЕКТРОСТАТИКА

52. Электрический заряд. Электризация тел	150
53. Закон Кулона	152
54. Электрическое поле	154
55. Напряжённость электрического поля	156
56. Проводники и диэлектрики в электрическом поле	158
57. Работа в электрическом поле. Потенциал	160
58. Электрическая ёмкость. Конденсаторы	162
59. Энергия заряженного конденсатора. Применение конденсаторов	164
60. Соединения конденсаторов	165
Решение задач	166
Подведём итоги	168

Глава 9. ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

61. Электрический ток	170
62. Закон Ома. Сопротивление проводника	172
63. Соединения проводников	174
64. Работа и мощность тока	176

65. Электродвижущая сила.	
Закон Ома для полной цепи	178
Решение задач	180
Подведём итоги	182

Глава 10. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

66. Природа электрического тока в металлах	184
67. Электрический ток в электролитах	186
68. Электрический ток в газах	188
69. Электрический ток в вакууме	190
70. Электрический ток в полупроводниках	192
Подведём итоги	196

Физика в вопросах и ответах...	197
--------------------------------	-----

Лабораторные работы	206
---------------------------	-----

Предметно-тематический указатель	222
--	-----

ВВЕДЕНИЕ

Учебник физики для 10 класса, который вы держите в руках, предназначен для тех, кто выбрал изучение физики на базовом уровне. Этим определяются стиль изложения материала, его структура и уровень сложности. Знание законов физики сегодня необходимо для того, чтобы стать успешным специалистом в самых разных областях: медицине, информационных технологиях, инженерных науках, биологии, химии и экологии. Современный человек должен владеть основами естественно-научной картины мира, в котором он живёт, а также понимать, как работают те многочисленные технические устройства, которые его окружают. Интересно, что мобильный телефон, который сегодня есть практически у каждого школьника, содержит технические решения, которые базируются на физических открытиях, заслуживших большое количество Нобелевских премий по физике.

Также мы ориентировались и на тех, кто в течение 10—11 классов так заинтересуется физикой, что захочет сдать Единый государственный экзамен по этому предмету. Для этого в учебнике содержится и материал повышенной сложности, который поможет в подготовке к этому непростому экзамену.

Знание физики позволит вам сориентироваться в огромном потоке информации и поможет отличить реальные факты от гипотез, домыслов и фантазий.

Физика — экспериментальная наука, поэтому, изучая физику, вы научитесь выполнять различные опыты и экспериментальные исследования, проводить измерения, анализировать их и делать соответствующие выводы и обобщения.

Физика и её законы являются ядром естествознания, поэтому, изучая физику, мы стараемся ответить на самые разнообразные вопросы об окружающем нас мире. Великий физик первой половины XX в. Альберт Эйнштейн писал: «Самое непостижимое в мире — то, что он постижим». Хотелось бы, чтобы, изучая физику, вы почувствовали настоящий интерес к этой науке и к более глубокому пониманию законов окружающего мира. Как говорил А. Эйнштейн, «очень важно не перестать задавать вопросы. Любопытство не случайно дано человеку».

Желаем вам успехов на пути постижения новых знаний!

Физический
блокнот

МОИ ФИЗИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ

Физический калейдоскоп

ВНИМАНИЕ!

РАБОТАЕМ С УЧЕБНИКОМ

Материал учебника включает десять тем, каждая из которых разделена на параграфы. Перед каждой темой в рубрике «Коротко о главном...» приводится высказывание одного из великих учёных, которое отражает суть содержания темы.

Параграф начинается с вводных рубрик «Вы узнаете...», «Вспомните...». Рубрика «Вы узнаете...» познакомит вас с основными вопросами, которые изучаются в параграфе. Рубрика «Вспомните...» подскажет, что необходимо вспомнить из ранее изученного материала, для того чтобы усвоить новый.

Основной текст параграфа сопровождают рубрики, которые помогут вам глубже понять наиболее важный материал.

Рубрика «Мои физические исследования» поможет вам научиться проводить физические опыты, иллюстрирующие физические законы.

В рубрике «Физический блокнот» содержатся интересные сведения и дополнительная информация к основному тексту параграфа.

Рубрика «Физический калейдоскоп» иллюстрирует текст параграфа примерами из жизни и техники.

Физические законы и формулы параграфа выделены в рубрике «Внимание!».

Графический элемент в виде лупы акцентирует ваше внимание на внутреннем содержании рисунка, детализирует изображение физического явления или процесса.

В темах, в которых необходимо более подробно рассмотреть решение физических задач, содержится раздел «Решение задач».

В параграфе также даны ссылки в виде стрелок. Они показывают, что изучение данного материала невозможно без использования задачника или тетради-практикума.

На последней странице каждой главы содержатся рубрики «Подведём итоги», «Вопросы для обсуждения» и обобщающие схемы, позволяющие представить материал главы в единстве и взаимосвязи, в лаконичной форме.

В рубрике «Подведём итоги» приводятся основные выводы и идеи, содержащиеся в главе.

Вопросы, содержащиеся в рубрике «Вопросы для обсуждения», носят проблемный характер и могут стать интересной темой для дискуссии.

Ссылки на интернет-ресурсы и литературу позволят привлечь дополнительные источники информации при изучении темы.

МЕХАНИКА КАК ФУНДАМЕНТ СОВРЕМЕННОЙ КАРТИНЫ МИРА



Основы физики, и в первую очередь механики, стали закладываться 2,5 тысячи лет назад. Главным образом это связано с именем Аристотеля, фигура которого поражает своим величием. Он систематизировал практически все знания, накопленные к тому времени человечеством о земном и небесном, о живом и неживом, об этике, о политике и об искусстве. Более двух тысяч лет авторитет Аристотеля считался непререкаемым. С современной точки зрения Аристотель не исследовал природу, а навёл порядок в её описании, опираясь на свой здравый смысл.

Другим великим греком, внёсшим вклад в развитие физики, был Архимед, живший веком позже Аристотеля. Архимед решал конкретные проблемы и не занимался построением картины мира. Он изобрёл множество машин и механизмов, открыл закон рычага, ввёл понятие центра тяжести и понял законы плавания тел, которые изучаются в школе и носят его имя. Архимед считался и великим математиком, причём его утверждения о физических явлениях не только были убедительны с точки зрения математики, но и могли быть проверены на опыте.

«Отцом современной физики и фактически современного естествознания вообще» А.Эйнштейн назвал Галилео Галилея, жившего около 400 лет назад. В отличие от Аристотеля, опиравшегося на очевидность, Галилей опирался на математику, эксперимент как метод исследования, мысленный идеализированный эксперимент и количественный анализ. Согласно Галилею эксперимент должен быть очищен от влияния случайных и мешающих факторов, например трения, сопротивления воздуха и т.п. Галилей проверял экспериментом даже общепринятые воззрения. Эксперимент, по Галилею, не иллюстрация, а метод исследования, который по возможности должен быть описан математически. Известны слова Галилея: «Большинство людей и при хорошем зрении не видят того, что другие открывают путём изучения и наблюдения, отделяющих истину от лжи, и что остаётся скрытым для большинства». Открытия того, что в пустоте все тела падают с одинаковым ускорением и что равномерное прямолинейное движение возможно в отсутствие действия силы, стали фундаментом современной механики. Эти законы зачеркнули механику Аристотеля, который утверждал, что тяжёлое тело падает быстрее лёгкого и что причиной равномерного прямолинейного движения является сила.

В начале XVI в. польский учёный Николай Коперник выдвинул очень смелую гипотезу, которая противоречила не только учению древних греков, но и незыблемым в то время церковным канонам. Он утверждал, что не Солнце и другие планеты вращаются вокруг Земли, а что Земля вместе с другими планетами вращается вокруг Солнца. Галилей поддержал Коперника и изложил гелиоцентрическую картину мира в своей книге «Диалог о двух главнейших системах мира — птолемеевой и копер-





никовой». Гелиоцентрическая система — один из краеугольных камней современной картины мира.

Исаак Ньютон завершил формирование современной механики. Он сформулировал три основных закона механики и разработал новый математический подход, который сегодня называют математическим анализом.

Ньютон сделал первое великое обобщение в современной физике. Из простого факта, известного всем, о том, что все тела падают на Землю, он вывел закон всемирного тяготения, который позволил объяснить и падение на поверхность Земли яблока, и движение Луны вокруг Земли, и движение Земли и других планет вокруг Солнца.

Хотя Ньютон и считается одним из величайших гениев в истории человечества, сам он говорил: «Если я видел дальше других, то потому, что стоял на плечах гигантов». И этими гигантами были Коперник, Галилей, Кеплер, Декарт.

Развитие научной мысли привело в XX в. к новому великому открытию — к созданию А.Эйнштейном теории относительности, позволившей построить новую научную картину мира, которая коренным образом изменила наши представления о пространстве, времени и природе гравитации. А.Эйнштейн писал: «Прости меня, Ньютон. Ты нашёл единственный путь, возможный в твоё время для человека величайшей научной творческой способности и силы мысли. Понятия, созданные тобой, и сейчас ещё остаются ведущими в нашем физическом мышлении, хотя мы теперь и знаем, что если мы будем стремиться к более глубокому пониманию взаимосвязей, то мы должны будем заменить эти понятия другими, стоящими дальше от сферы непосредственного опыта».



Механика, основанная на законах Ньютона, называется классической механикой или механикой Ньютона. В настоящее время известно, что законы Ньютона не являются абсолютно точными. Классическая механика хорошо описывает движение тел, размеры которых значительно больше размеров атомов и молекул, а скорости существенно меньше скорости света. Таким образом, законы классической механики применимы для описания как движения окружающих нас тел, так и движения астрономических объектов. Для описания же явлений микромира необходимо применять законы квантовой механики.

Раздел механики, в котором рассматривается движение тел без выяснения причин этого движения, называют кинематикой.

Раздел механики, в котором изучаются причины движения тел, называют динамикой.

Раздел механики, в котором изучаются условия равновесия механических систем под действием приложенных к ним сил, называют статикой.

Механика стала источником универсальных средств и методов изучения разнообразных процессов не только в физике, но и в таких далёких от неё отраслях знаний, как экономика, социология, экология.





Глава 1

КИНЕМАТИКА

- ПРОСТРАНСТВО И ВРЕМЯ
- МЕХАНИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ
- СПОСОБЫ ОПИСАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА
- РАВНОМЕРНОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ
- КЛАССИЧЕСКИЙ ЗАКОН СЛОЖЕНИЯ СКОРОСТЕЙ
- НЕРАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ
- РАВНОПЕРЕМЕННОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ
- ДВИЖЕНИЕ С УСКОРЕНИЕМ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ
- ДВИЖЕНИЕ ПО ОКРУЖНОСТИ
- РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

РАЗДЕЛ I



МЕХАНИКА

КОРОТКО О ГЛАВНОМ...

Больше всего — пространство, ибо оно вмещает всё. Быстрее всего — мысль, ибо она бежит без остановки. Сильнее всех — необходимость, ибо она одолевает всех. Мудрее всего — время, ибо оно обнаруживает всё.

Фалес Милетский

ПРОСТРАНСТВО И ВРЕМЯ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

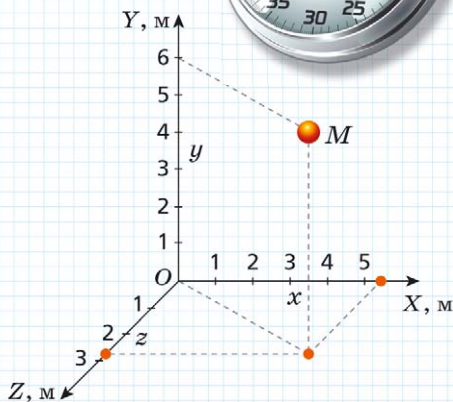
- Что такое система координат и система отсчёта.
- Основные свойства пространства и времени.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое декартова система координат?
- Какие четыре измерения имеет наш мир?
- Единицы длины и времени в системе СИ.

Взаимосвязь пространства и времени через движение понимали ещё античные философы. В частности, Лукреций считал, что вне движения время ощущаться не может:

«...И неизбежно признать, что никем ощущаться не может
Время само по себе, вне движения тел и покоя».



Понятия пространства и времени относятся к числу изначальных и фундаментальных понятий в физике. Наша Вселенная имеет три пространственных измерения и одно временное.

ПОЛОЖЕНИЕ ТЕЛА В ПРОСТРАНСТВЕ Для описания положения точки в пространстве можно использовать трёхмерную прямоугольную (декартову) систему координат. Что такое система координат с точки зрения математики? Это некоторая точка, выбранная в качестве начала координат (точка O), в которой пересекаются три взаимно перпендикулярные прямые. На каждой из этих прямых стрелочкой задаётся положительное направление (оси OX , OY , OZ), а также произвольным образом задаётся масштаб — длина единичного отрезка.

Положение точки M в пространстве относительно начала координат задаётся её координатами x , y , z , т.е. проекциями положения точки M на оси OX , OY , OZ .

Задача механики — описать движение тел, т.е. изменение их положения в пространстве. Под положением тела понимается *относительное положение*, а именно положение тела относительно других тел.

Это означает, что необходимо связать начало системы координат с каким-либо физическим телом и рассматривать движение остальных тел относительно этого тела.

Например, мы можем связать начало координат с Солнцем и рассматривать движение планет Солнечной системы относительно Солнца. Тело, по отношению к которому рассматривается данное механическое движение, называют **телом отсчёта**.

Физика — точная наука, и механическое движение должно быть описано количественно. Поэтому, когда речь идёт о координатах x , y , z тела, необходимо указать способ их измерения.

Эти координаты являются длинами, а это означает, что их нахождение сводится к измерению длины, т.е. к сравнению с эталоном.

В системе СИ единицей длины является *метр*.

СИСТЕМА ОТСЧЁТА Описывая механическое движение тела, мы говорим о том, что в определённый момент времени тело находится в некотором месте пространства. Поэтому системы координат уже недостаточно, необходим ещё и прибор для измерения времени — *часы*.

Следует подчеркнуть: *под временем понимается промежуток между двумя событиями или моментами времени*.

В случае если не указаны оба события, характеризующие временной интервал, всё равно предполагается, что один из моментов времени был принят за начальный, точно так же как начало системы координат привязывалось к телу отсчёта.

Система координат, связанная с телом отсчёта, и часы для отсчёта времени образуют *систему отсчёта*, позволяющую определять положение движущегося тела в любой момент времени.

ПРОСТРАНСТВО И ВРЕМЯ В КЛАССИЧЕСКОЙ ФИЗИКЕ До создания современной картины мироздания, основные положения которой были сформулированы в первой четверти прошлого столетия, пространство и время рассматривались совершенно независимо друг от друга. В классической физике, олицетворением которой является механика Ньютона, пространство и время существуют сами по себе, не испытывая никаких воздействий со стороны тел и явлений. При этом время во всех точках пространства всегда течёт одинаково и едино для всего пространства. Такое время, существующее само по себе, вне тел и явлений, называют **абсолютным временем**.

В механике Ньютона все моменты времени равноправны, причём ход времени является одинаково равномерным всегда. *Два события, одновременные в одной системе отсчёта, будут одновременными и в любой другой.* Данный конкретный момент времени будет иметь абсолютный смысл для всего мира. Например, такое грандиозное событие, как вспышка сверхновой звезды, будет одновременно зафиксировано как по часам земного наблюдателя, так и по часам наблюдателей, один из которых находится на борту космической станции, а другой — в далёкой галактике.

В классической механике пространство, как и время, также *абсолютно и однородно*, его свойства с течением времени не изменяются. Все направления в таком пространстве равноправны, что означает *изотропность* пространства. Однородность и изотропность пространства означают, что *все законы механики, включая законы сохранения, не претерпевают никаких изменений при переходе от одних точек пространства к другим.*

Наш повседневный житейский опыт показывает, что в пространстве, в котором мы живём, кратчайшим расстоянием между двумя точками является прямая линия. Такое пространство называется **евклидовым**, так как оно описывается геометрией Евклида.

Следует отметить, что, хотя в классической физике пространство и время рассматриваются как две самостоятельные сущности, признаётся их очевидная взаимосвязь через движение.

РАЗВИТИЕ ВЗГЛЯДОВ НА ПРОСТРАНСТВО И ВРЕМЯ Взгляды на пространство и время кардинально изменились с созданием в начале XX в. **теории относительности**.

В теории относительности пространство и время утрачивают свой абсолютный характер. Время уже нельзя рассматривать вне пространства, в отрыве от конкретной системы отсчёта.

Измерение длины непосредственным прикладыванием эталона называют *прямым измерением*. Однако такие измерения далеко не всегда возможны. В этих случаях применяют *косвенные методы*, в которых значение физической величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, поддающимися прямым измерениям.

С детства мы привыкаем к окружающему миру, каким он воспринимается нашими пятью чувствами; именно в детстве у нас формируются фундаментальные представления о пространстве, времени и движении. Наш разум вскоре настолько осваивается с этими понятиями, что впоследствии мы склонны считать единственно возможным наше основанное на них представление о внешнем мире и любая мысль об изменении этих понятий кажется нам парадоксальной. Однако развитие точных физических методов наблюдения и более глубокий анализ наблюдаемых соотношений привели современную науку к вполне определённому выводу о том, что... совершенно необходимо внесение некоторых изменений в фундаментальные понятия — пространство, время и движение.

Г. Гамов.
«Приключения
Мистера Томпкинса»

ВОПРОСЫ:

- Что такое система отсчёта?
- Какие свойства пространства и времени вы знаете?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое траектория, путь, перемещение.
- Какое движение называют поступательным.
- Какие виды механического движения существуют.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое механическое движение?
- Какие величины называют скалярными, а какие — векторными?

МЕХАНИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ

«Дайте мне материю и движение, и я построю Вселенную», — говорил Рене Декарт.

ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ Что можно сказать о движении книги, лежащей на столе в купе движущегося поезда? Она покоится относительно стола, движется вместе с поездом относительно Земли, сама Земля вращается вокруг своей оси и движется по определённой орбите относительно Солнца. Следовательно, движение тела можно рассматривать по отношению к различным телам, т.е. единственной или универсальной системы отсчёта в природе не существует.

Механическим движением тела называют изменение положения тела в пространстве относительно других тел с течением времени. Движение тела, а также состояние покоя, относительны.



В середине XVI в. революцию в науке произвёл польский учёный Н.Коперник. Он задался простым вопросом: «Как бы выглядело звёздное небо, если смотреть на него с Солнца?» Ответом стала гелиоцентрическая система, сменившая геоцентрическую систему, в которой Земля являлась неподвижным центром Вселенной. Главной проблемой системы Коперника было то, что в ней Земля и всё живое на ней двигалось с огромной скоростью в тысячи километров в час. Решить эту проблему удалось Галилею с помощью его принципа относительности, из которого следует в том числе и то, что в земных условиях астрономическая скорость Земли практически не заметна.

ТРАЕКТОРИЯ Когда тело с течением времени изменяет своё положение в пространстве, то оно движется по некоторой линии, называемой *траекторией движения тела*. Траектория может быть видимой (следы сторающих частиц при запуске фейерверков и т.п.) или невидимой. Форма траектории зависит от выбора тела отсчёта. Например, если за тело отсчёта выбрать вертолёт, то траектория точки на лопасти пропеллера является окружностью. Если же за тело отсчёта принять Землю, то траектория точки этого тела будет иметь более сложную форму.

ПОСТУПАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ При движении тела траектории разных его точек могут быть различны. Например, точки на оси вращения движущегося колеса и на его ободе описывают разные траектории. Наиболее простое движение тела — это такое движение, при котором все точки тела движутся одинаково, описывая одинаковые траектории. Такое движение называют *поступательным*. Например, вагон поезда движется прямолинейно по рельсам. В любой момент времени все точки вагона движутся одинаково. При поступательном движении любая



прямая, проведённая в теле, остаётся параллельной самой себе. Для того чтобы понять, является ли движение тела поступательным, надо рассмотреть характер движения отрезка, соединяющего любые точки тела, и воспользоваться этим признаком.

МАТЕРИАЛЬНАЯ ТОЧКА В некоторых случаях при описании движения можно не учитывать размеры тела, а рассматривать его как материальную точку. Например, если требуется рассчитать время движения автомобиля, движущегося от одного населённого пункта до другого, то в этом случае не важны размеры автомобиля. Однако при въезде в гараж его размеры играют существенную роль. Ещё раз подчеркнём, что ответ на вопрос о том, можно ли считать тело материальной точкой, зависит не от размеров тела, а от конкретной ситуации.

Понятие материальной точки является моделью, позволяющей упростить изучение движения реального тела. Таким образом, материальная точка не имеет геометрических размеров, но обладает массой. Даже если мы не пренебрегаем размерами тела и не считаем его точечным, при поступательном движении достаточно описать движение одной из точек этого тела, поскольку все его точки движутся одинаково.

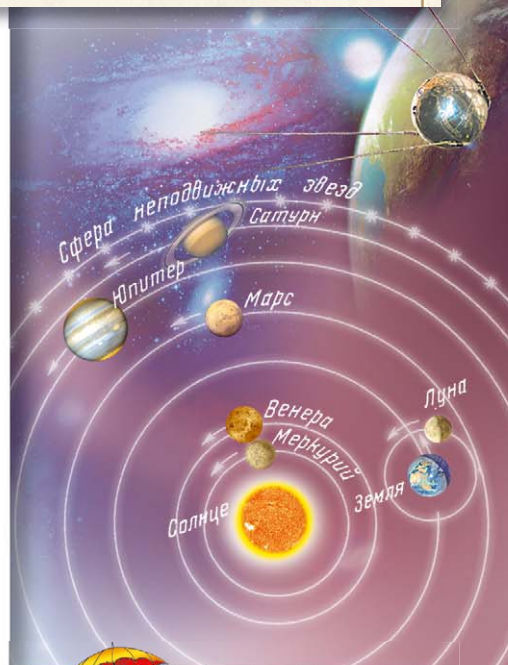
ПУТЬ Траектория тела характеризуется не только формой, но и длиной. Длину траектории, по которой движется тело в течение некоторого промежутка времени, называют *пройденным путём*. Путь является величиной скалярной, т.е. не имеющей направления.

ПЕРЕМЕЩЕНИЕ Изменение положения тела в пространстве относительно выбранной системы отсчёта характеризуется физической величиной — *перемещением*.

Перемещение — направленный отрезок, соединяющий начальное и конечное положения тела на траектории. Перемещение — величина векторная, т.е. имеющая направление и модуль. Модуль перемещения показывает расстояние между начальной и конечной точками движения. Единицей перемещения (его модуля), как и единицей пути, является *метр*. Если известны начальное положение тела и вектор перемещения, можно однозначно определить конечное положение тела в пространстве.

ВИДЫ МЕХАНИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ В зависимости от того, является ли траектория движения тела прямой или нет, движение подразделяется на *прямолинейное* и *криволинейное*. Если тело за любые равные промежутки времени проходит равные пути, то его движение называют *равномерным*. Равномерное движение может быть как прямолинейным, так и криволинейным. Если же тело за равные промежутки времени проходит разные пути, то его движение называют *неравномерным*.

При описании какого-либо явления реального мира всегда приходится прибегать к разного рода упрощениям, поскольку, с одной стороны, это явление достаточно сложно, а с другой стороны, описание явления существенно зависит от поставленной задачи. Чаще всего в науке удобнее изучать упрощённый образ явления — его модель. Движение материальной точки можно считать моделью движения реальных тел.



ВОПРОСЫ:

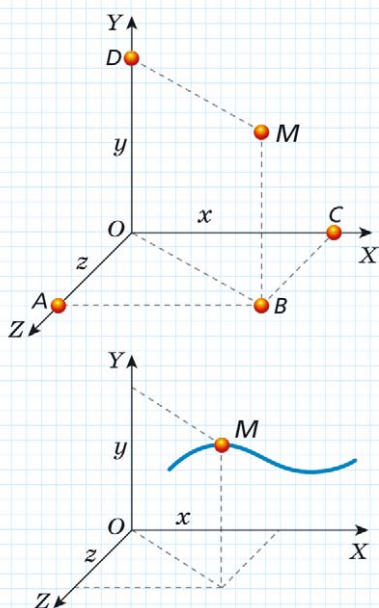
- Что такое траектория, путь и перемещение?
- Какое движение называют поступательным?
- Когда тело можно считать материальной точкой?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Какие способы описания движения существуют в механике.
- Как найти проекции вектора перемещения на координатные оси и его длину.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое тело отсчёта и система отсчёта?
- Какие существуют системы координат?
- Как найти проекции вектора на координатные оси?



СПОСОБЫ ОПИСАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА

Описать движение тела означает научиться отвечать на вопросы: где находится тело в данный момент времени и в каких точках пространства оно будет находиться в следующие моменты времени?

ВЫБОР СИСТЕМЫ ОТСЧЁТА Рассмотрим различные случаи движения тела. Например, тело падает вниз. При таком движении для определения положения тела в каждый момент времени достаточно одной координатной оси. Если тело отсчёта находится в начале движения и координатная ось направлена вниз, то координата тела увеличивается. А если начало отсчёта связано с поверхностью Земли, а ось направлена вверх, то координата тела уменьшается. Для описания движения на плоскости используется прямоугольная декартова система координат. Например, когда автомобиль движется из одного города в другой, его движение, как правило, является криволинейным и описывается двумя координатами. В случае если тело перемещается в пространстве, необходимо использовать трёхмерную прямоугольную декартову систему координат. Это нужно, например, для описания движения самолёта, космического корабля и т.д. Безусловно, каждая из приведённых выше систем отсчёта содержит и часы.

КООРДИНАТНЫЙ СПОСОБ ОПИСАНИЯ ДВИЖЕНИЯ Для того чтобы задать положение точки в пространстве, необходимо определить систему координат. Если речь идёт о положении точки на плоскости, то после выбора тела отсчёта определяется точка O , через которую проводят две взаимно перпендикулярные оси OX , OY . В полученной системе координат положение точки определяется координатами x , y . Если необходимо определить положение точки в пространстве, то через точку отсчёта O проводят три взаимно перпендикулярные оси OX , OY и OZ , и положение точки определяется координатами x , y и z .

При движении тела его положение изменяется с течением времени относительно тела отсчёта. *Координатный способ* описания движения заключается в том, что в выбранной системе отсчёта рассматривается зависимость изменения координат тела от времени, т.е. координаты тела (материальной точки) можно записывать как функции времени:

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t). \end{cases} \quad (1)$$

В зависимости от вида движения в каждом конкретном случае функции (1) будут иметь определённый вид.

РАДИУС-ВЕКТОР. ВЕКТОРНЫЙ СПОСОБ ОПИСАНИЯ ДВИЖЕНИЯ

Положение точки в пространстве можно определять не только при помощи координат, но и при помощи вектора, начало которого совпадает с началом координат. **Радиус-вектором** ($\vec{OM}$) называют направленный отрезок, соединяющий начало координат O и точку M с произвольными координатами. Радиус-вектор принято обозначать через $\vec{r}$.

При движении точки радиус-вектор с течением времени будет изменяться, поэтому при векторном способе описания движения рассматривается функция

$$\vec{r} = \vec{r}(t). \quad (2)$$

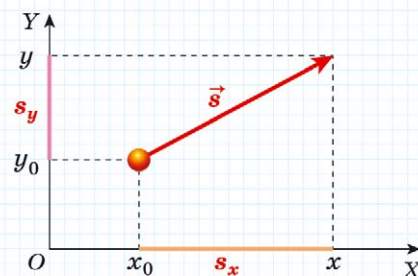
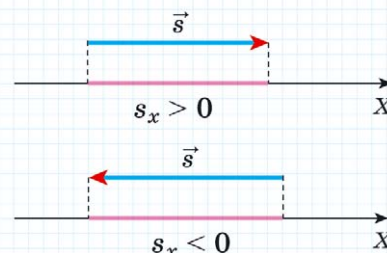
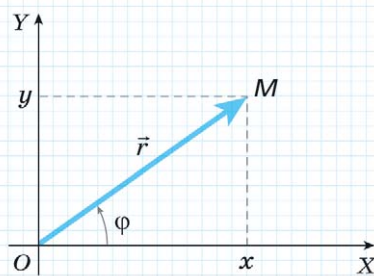
Уравнения (1) и (2) называют **кинематическими уравнениями движения точки, записанными соответственно в координатной и векторной форме.**

На плоскости координаты x и y точки M являются проекциями радиус-вектора $\vec{r}$ на координатные оси:

$$r^2 = r_x^2 + r_y^2 = x^2 + y^2.$$

Положение любой точки M определяется при помощи радиус-вектора при условии, что известна длина радиус-вектора, концом которого является эта точка, а также положение этого радиус-вектора относительно осей координат. Для определения положения радиус-вектора на плоскости относительно двумерной системы координат достаточно знать угол φ между ним и осью OX :

$$x = r \cdot \cos \varphi, \quad y = r \cdot \sin \varphi.$$



ПРОЕКЦИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ НА КООРДИНАТНЫЕ ОСИ

Если известен вектор перемещения тела, то при расчётах используют не координаты вектора, а его проекции на оси координат. При этом *проекция вектора на ось считается положительной, если координата конца вектора перемещения оказывается больше координаты его начала.* В противном случае проекция считается отрицательной. Когда вектор и ось параллельны, то длина вектора равна его проекции на эту ось. Если $(x_0; y_0)$ и $(x; y)$ — координаты начала и конца вектора, то его проекции на оси абсцисс и ординат будут соответственно равны

$$s_x = x - x_0, \quad s_y = y - y_0.$$

Зная проекции вектора перемещения, можно найти его длину (модуль) по теореме Пифагора:

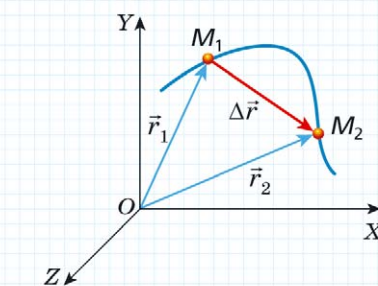
$$s^2 = s_x^2 + s_y^2. \quad (3)$$

При векторном способе описания движения перемещение можно рассматривать как изменение радиус-вектора движения тела:

$$\Delta \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1.$$

ПЕРЕМЕЩЕНИЕ И ВЫБОР ТЕЛА ОТСЧЁТА

При выборе разных неподвижных систем отсчёта координаты начальной и конечной точек движущегося тела будут различны. При этом модуль перемещения (3) остаётся *постоянным*, т.е. не зависит от выбора системы отсчёта.



ВОПРОСЫ:

- Какие уравнения называют кинематическими уравнениями движения?
- Как найти проекции перемещения на координатные оси?
- Как перемещение зависит от выбора разных тел отсчёта?

РАВНОМЕРНОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

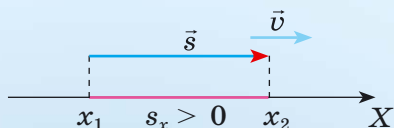
- Как определить проекции скорости на координатные оси.
- Какие графики используют для представления равномерного прямолинейного движения.
- Как найти положение тела, равномерно движущегося по плоскости.

ВСПОМНИТЕ:

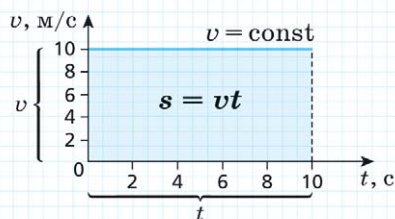
- Что такое скорость и перемещение при равномерном прямолинейном движении?
- Как определить координаты тела, движущегося равномерно и прямолинейно?

Если обозначить величины: скорость — $\vec{v}$, перемещение — $\vec{s}$, время — Δt , то скорость равномерного прямолинейного движения рассчитывают по формуле

$$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{\Delta t}.$$



В Международной системе единиц (СИ) за единицу скорости принимают скорость такого равномерного прямолинейного движения, при котором движущееся тело за 1 с проходит путь, равный 1 м. Эту единицу (1 метр в секунду) обозначают 1 м/с.



Если тела за любые равные промежутки времени проходят равные пути, то такое движение называют **равномерным**. Несмотря на то, что такой вид движения на практике встречается редко, для упрощения описания реального движения используют физическую модель — равномерное прямолинейное движение.

СКОРОСТЬ ПРИ РАВНОМЕРНОМ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ ДВИЖЕНИИ

Скорость при равномерном прямолинейном движении показывает, какое перемещение совершает тело за единицу времени. Пусть тело двигалось равномерно и прямолинейно, и за время Δt перешло из положения M_1 в положение M_2 . При этом путь тела равен модулю его перемещения. Обозначим $\overline{M_1 M_2} = \vec{s}$ и введём понятие скорости равномерного прямолинейного движения.

Скоростью равномерного прямолинейного движения называют векторную физическую величину, равную отношению перемещения к промежутку времени, в течение которого это перемещение произошло:

$$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{\Delta t}. \quad (1)$$

Направление скорости равномерного прямолинейного движения совпадает с направлением перемещения, а модуль скорости показывает, какое расстояние пройдено телом за единицу времени.

ЗНАК ПРОЕКЦИИ СКОРОСТИ ПРИ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ ДВИЖЕНИИ

Пусть в момент времени t_1 тело находилось в точке с координатой x_1 , а затем в момент времени t_2 — в точке с координатой x_2 . Время движения тела равно $\Delta t = t_2 - t_1$, и эта величина всегда положительна, так как $t_2 > t_1$. Знак разности $x_2 - x_1$ зависит от того, в каком направлении по отношению к оси OX двигалось тело. При этом путь s , пройденный телом, будет равен $s = |x_2 - x_1|$.

Таким образом, если речь идёт о модуле скорости, то эта величина всегда неотрицательна:

$$v = \frac{s}{\Delta t} = \frac{|x_2 - x_1|}{t_2 - t_1}.$$

А если речь идёт о проекции скорости на ось OX , то знак этой величины зависит от того, в каком направлении относительно оси двигалось тело:

$$v_x = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}. \quad (2)$$

УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПРИ РАВНОМЕРНОМ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ ДВИЖЕНИИ

Зная скорость равномерного прямолинейного движения, можно найти перемещение тела за любой промежуток времени: $\vec{s} = \vec{v}t$.

Если направление координатной оси совпадает с направлением движения тела, то для расчёта модуля перемещения тела можно использовать формулу

$$s_x = v_x t. \quad (3)$$

Обозначим начальную координату тела через x_0 , а конечную координату — через x . Тогда

$$s_x = x - x_0 = v_x t.$$

Отсюда

$$x = x_0 + v_x t. \quad (4)$$

Уравнение (4) является *уравнением движения при равномерном прямолинейном движении*.

ГРАФИКИ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ, ПЕРЕМЕЩЕНИЯ И КООРДИНАТЫ ТЕЛА ОТ ВРЕМЕНИ

При равномерном прямолинейном движении скорость тела с течением времени остаётся неизменной, поэтому график зависимости модуля вектора скорости от времени — это прямая, параллельная оси абсцисс. Зафиксируем время, прошедшее от начала движения, и опустим перпендикуляр из выбранной точки на график скорости. Площадь полученного прямоугольника равна произведению vt . Но известно, что $s = vt$. Таким образом, модуль вектора перемещения численно равен площади прямоугольника под графиком скорости.

График зависимости перемещения тела от времени — это прямая, проходящая через начало координат. Выберем на прямой точку A и определим перемещение s_1 и соответствующий момент времени t_1 . Скорость движения тела будет равна: $v = s_1/t_1$. Чем больше угол наклона графика перемещения к оси абсцисс, тем больше скорость движения тела.

Поскольку зависимость координаты тела от времени (4) — линейная, то соответствующий график представляет собой прямую линию. В начальный момент времени $t = 0$ координата $x = x_0$.

РАВНОМЕРНОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ НА ПЛОСКОСТИ

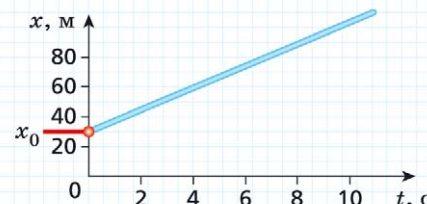
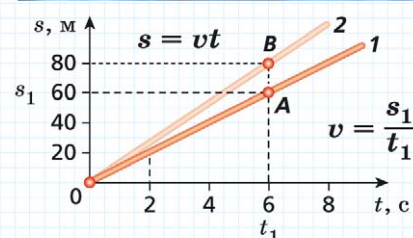
Если направление движения тела не совпадает с направлением координатной оси, то говорят о движении на плоскости (в пространстве). Чтобы найти положение тела на плоскости в произвольный момент времени, т.е. его координаты x и y , нужно знать начальные координаты x_0 и y_0 тела, а также проекции v_x и v_y его скорости на координатные оси. Поэтому при координатном способе описания движения получаем систему уравнений

$$\begin{cases} x = x_0 + v_x t \\ y = y_0 + v_y t. \end{cases}$$

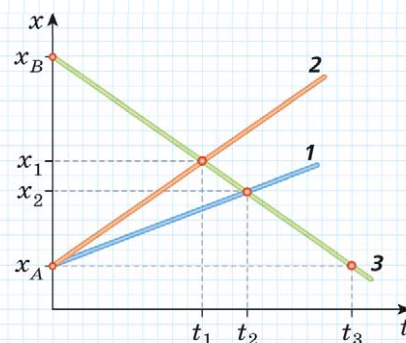
Исключив время из этой системы уравнений, получим зависимость между координатами x и y , т.е. уравнение траектории

$$y = y_0 + \frac{v_y}{v_x}(x - x_0).$$

Как видно, траекторией тела является прямая линия.



На графике изображено движение трёх тел: тела 1 и 2 имеют одинаковую начальную координату x_A , модуль скорости тела 2 больше модуля скорости тела 1. Тело 3 имеет начальную координату x_B ($x_B > x_A$), проекция скорости тела 3 отрицательна.



ВОПРОСЫ:

- От чего зависит знак проекции скорости на координатные оси?
- Что представляют собой графики зависимости скорости, перемещения и координаты тела от времени при равномерном прямолинейном движении?
- Как описать прямолинейное движение тела на плоскости?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

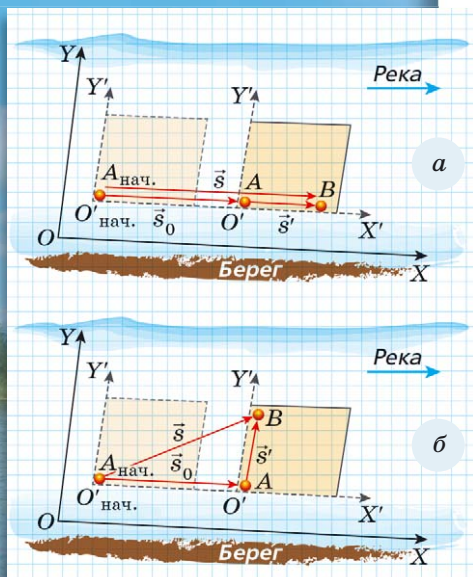
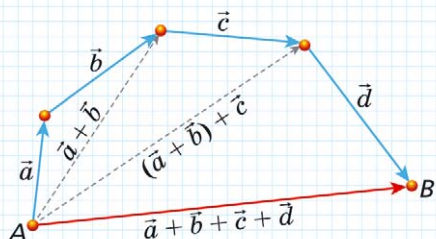
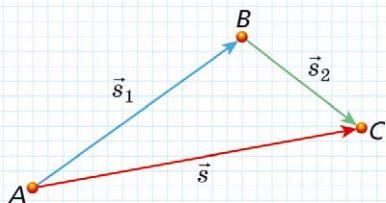
● Как вычислять скорость тела при переходе из одной системы отсчёта в другую.

● Что такое относительная скорость.

ВСПОМНИТЕ:

● Как можно складывать и вычитать векторы?

● Что такое скорость и перемещение при равномерном прямолинейном движении?

**КЛАССИЧЕСКИЙ ЗАКОН
СЛОЖЕНИЯ СКОРОСТЕЙ**

Как известно, траектория движения тела зависит от выбранной системы отсчёта. Зависит ли скорость тела от выбора системы отсчёта?

СЛОЖЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ Рассмотрим последовательное перемещение тела на плоскости сначала из точки A в точку B , а затем из точки B в точку C . Обозначим перемещение $\overline{AB} = \vec{s}_1$, а перемещение $\overline{BC} = \vec{s}_2$. Вектор результирующего перемещения тела, равный $\overline{AC} = \vec{s} = \vec{s}_1 + \vec{s}_2$, соединяет начальное положение тела с конечным и показывает, насколько и в каком направлении тело переместится на плоскости. Все действия с перемещениями, являющимися векторными величинами, осуществляются по правилам, определённым для векторов. В данном случае сумму перемещений можно найти по правилу треугольника. При этом неважно, каким было движение при каждом перемещении.

Если необходимо найти сумму нескольких последовательных перемещений, нужно начало первого вектора перемещения соединить с концом последнего. Получившийся вектор и будет геометрической суммой нескольких перемещений.

Рассмотренные выше примеры сложения перемещений были связаны с конкретной неподвижной системой отсчёта $ХОУ$. Вместе с тем большой практический интерес представляет анализ движения тела с точки зрения двух систем отсчёта, одна из которых считается неподвижной, а другая движется относительно первой равномерно и прямолинейно.

В качестве подвижной системы отсчёта $Х'О'У'$ рассмотрим плот, движущийся относительно берега со скоростью течения реки. Неподвижную систему отсчёта $ХОУ$ свяжем с берегом реки и для простоты рассуждения будем предполагать, что оси $ОХ$ и $О'Х'$ параллельны.

Пусть человек, находящийся на плоту, перемещается из точки A в точку B . Рассмотрим два случая: *а* человек перемещается по плоту параллельно оси $О'Х'$; *б* человек перемещается по плоту параллельно оси $О'У'$. Обозначим перемещение в системе отсчёта $Х'О'У'$ $\overline{AB} = \vec{s}'$. В течение времени, которое потребовалось человеку на это перемещение, плот двигался по течению реки, и его перемещение составило $\overline{О'_{нач.}О'} = \vec{s}_0$. Тогда результирующее перемещение человека относительно неподвижной системы отсчёта, связанной с берегом, будет равно векторной сумме перемещений:

$$\vec{s} = \vec{s}_0 + \vec{s}'. \quad (1)$$

При этом из рисунков видно, что выражение (1) верно и для случая *а*, и для случая *б*, т.е. не зависит от направления движения человека относительно плота.

КЛАССИЧЕСКИЙ ЗАКОН СЛОЖЕНИЯ СКОРОСТЕЙ

Если обозначить через Δt промежуток времени, в течение которого произошли перемещения плота и человека, то выражения для соответствующих скоростей можно записать в виде

$$\vec{v}_0 = \frac{\vec{s}_0}{\Delta t}, \quad \vec{v}' = \frac{\vec{s}'}{\Delta t}. \quad (2)$$

В формулах (2) $\vec{v}_0$ — скорость течения реки (или плота), а $\vec{v}'$ — скорость человека относительно плота. Поделив обе части равенства (1) на Δt и учитывая равенства (2), получим

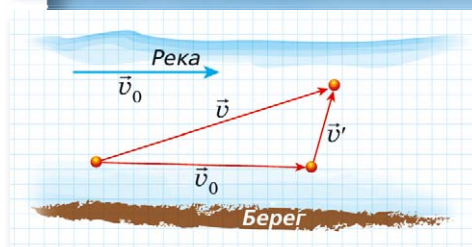
$$\frac{\vec{s}}{\Delta t} = \frac{\vec{s}_0}{\Delta t} + \frac{\vec{s}'}{\Delta t}, \quad \text{или} \quad \vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{v}'. \quad (3)$$

Таким образом, скорость человека относительно неподвижной системы отсчёта равна векторной сумме его скорости относительно подвижной системы отсчёта и скорости подвижной системы отсчёта относительно неподвижной. Формула (3) представляет собой **классический закон сложения скоростей**.

Закон сложения скоростей выполняется и при неравномерном движении. В этом случае складываются мгновенные скорости.

Классический закон сложения скоростей

гласит: если тело движется относительно некоторой системы отсчёта K_1 со скоростью $\vec{v}_0$ и сама система отсчёта K_1 движется относительно другой системы отсчёта K_2 со скоростью $\vec{v}'$, то скорость тела относительно системы отсчёта K_2 равна геометрической (векторной) сумме скоростей $\vec{v}_0$ и $\vec{v}'$.



$\vec{v}_{12}$ — скорость первого автомобиля относительно наблюдателя, находящегося во втором автомобиле.

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ СКОРОСТЬ

Пусть два автомобиля приближаются навстречу друг другу каждый со скоростью 60 км/ч относительно земли. Тогда скорость сближения автомобилей будет равна 120 км/ч, т.е. для наблюдателя в одном из автомобилей другой автомобиль будет казаться приближающимся со скоростью 120 км/ч. Аналогично, когда один автомобиль, движущийся со скоростью 80 км/ч, обгоняет другой, у которого скорость равна 60 км/ч, скорость сближения будет равна 80 км/ч – 60 км/ч = 20 км/ч. Если же оба автомобиля движутся в одном направлении с одинаковыми скоростями, то относительно друг друга они будут неподвижны.

Это примеры задач, в которых использовано понятие *относительная скорость*.

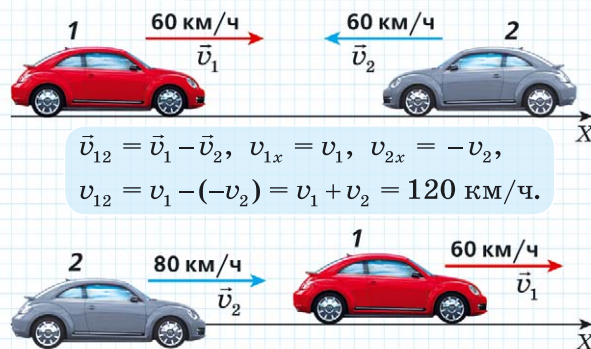
Чтобы получить формулу для вычисления относительной скорости двух тел, обратимся к рассмотренному выше примеру движения плота. Согласно формуле (3) скорость человека относительно плота

$$\vec{v}_{\text{отн}} = \vec{v}' = \vec{v} - \vec{v}_0. \quad (4)$$

Таким образом, чтобы найти скорость первого тела относительно второго, нужно из скорости первого тела вычесть скорость второго:

$$\vec{v}_{12} = \vec{v}_{\text{отн}} = \vec{v}_1 - \vec{v}_2,$$

где $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$ — скорости тел относительно неподвижной системы отсчёта.



$$\vec{v}_{12} = \vec{v}_1 - \vec{v}_2, \quad v_{1x} = v_1, \quad v_{2x} = v_2, \\ v_{12} = v_1 - v_2 = v_1 - v_2 = -20 \text{ км/ч.}$$

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Как найти перемещение тела относительно выбранной системы отсчёта?
- В чём состоит классический закон сложения скоростей?
- Приведите примеры, когда можно говорить об относительной скорости движения тела.

ВЫ УЗНАЕТЕ:

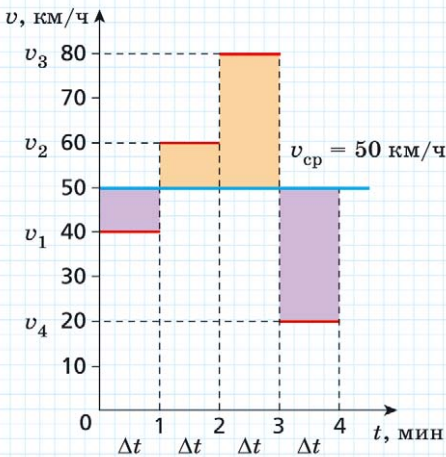
- Что такое средняя путевая скорость.
- Что такое мгновенная скорость.
- Как по графику скорости можно определить модуль перемещения.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое равномерное и неравномерное движение?
- Что собой представляет график скорости при равномерном движении?

Если обозначить величины: средняя скорость — $v_{\text{ср}}$, путь — s , время — Δt , то среднюю путевую скорость неравномерного движения рассчитывают по формуле

$$v_{\text{ср}} = \frac{s}{\Delta t}.$$



$$v_{\text{ср}}$$

$$\frac{v_1 \cdot \Delta t + v_2 \cdot \Delta t + v_3 \cdot \Delta t + v_4 \cdot \Delta t}{4\Delta t}$$

$$\frac{1}{4} (v_1 + v_2 + v_3 + v_4)$$

$$50 \text{ км/ч}$$

НЕРАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Анализ большинства реальных движений в окружающем нас мире показывает, что эти движения являются неравномерными, т.е. тело за любые равные промежутки времени проходит разные пути.

СРЕДНЯЯ ПУТЕВАЯ СКОРОСТЬ

Для характеристики неравномерного движения вводят понятие средней скорости. Средняя скорость тела при неравномерном движении показывает, какой путь проходит тело в единицу времени, т.е. весь пройденный телом путь необходимо разделить на полное время движения тела, включая остановки:

$$v_{\text{ср}} = \frac{s}{\Delta t}.$$

Полученное значение показывает среднюю скорость движения тела на всём пути, и оно может не совпадать со значением скорости в различные моменты времени движения.

Важно отметить, что *средняя путевая скорость является скалярной физической величиной*. При описании движения при помощи средней путевой скорости мы фактически заменяем неравномерное движение равномерным, скорость которого равна средней скорости неравномерного движения.

МГНОВЕННАЯ СКОРОСТЬ

При движении тело проходит последовательно все точки траектории. В каждой точке оно находится в определённые моменты времени и имеет определённую скорость. *Скорость тела в данный момент времени или в данной точке траектории называют мгновенной скоростью*.

Для уяснения смысла мгновенной скорости потребуются дополнительные рассуждения. Например, как определить мгновенную скорость автобуса в некоторый момент времени t , соответствующий началу торможения? По мере уменьшения промежутков времени фактическое движение в пределах каждого отдельного промежутка времени будет всё меньше отличаться от равномерного, и наконец отличия перестанут улавливать приборы. В пределах малых промежутков времени, столь малых, что движение представляется равномерным, результат измерения можно относить к любому моменту времени в пределах рассматриваемого промежутка. Если движение равномерное, то его мгновенная скорость в любой момент времени равна скорости этого равномерного движения.

Мгновенной скоростью поступательного движения тела в момент времени t называют векторную физическую величину, равную отношению малого перемещения $\Delta \vec{s}$ к малому промежутку времени Δt , за который произошло это перемещение:

$$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t}.$$

При уменьшении длительности промежутка времени Δt направление вектора перемещения $\Delta \vec{s}$ приближается к направлению касательной к траектории движения. Поэтому вектор мгновенной скорости в каждой точке траектории направлен по касательной к траектории движения тела в этой точке и в сторону движения тела.

Обсудим понятие мгновенной скорости на конкретном примере неравномерного движения. Пусть координата прямолинейно движущегося тела изменяется в соответствии с графиком **a**. Этот график является кривой, которую можно описать уравнением $x = kt^2$. Для того чтобы сохранялась размерность левой и правой частей равенства, размерность константы k должна быть м/с^2 , т.е. $\text{м} = \text{м/с}^2 \cdot \text{с}^2$.

Пусть $k = 10 \text{ м/с}^2$. В этом случае скорость тела с течением времени изменяется. Используя понятие средней скорости, с помощью калькулятора вычислим мгновенную скорость тела в момент времени $t = 1 \text{ с}$. Для этой цели найдём изменение координаты тела за последовательно уменьшающиеся промежутки времени $\Delta t_1 = 0,1 \text{ с}$; $\Delta t_2 = 0,01 \text{ с}$; $\Delta t_3 = 0,001 \text{ с}$ и т.д.:

$$\Delta x_1 = 10 \text{ м/с}^2 \cdot (1,1 \text{ с})^2 - 10 \text{ м/с}^2 \cdot (1 \text{ с})^2 = 2,1 \text{ м};$$

$$\Delta x_2 = 10 \text{ м/с}^2 \cdot (1,01 \text{ с})^2 - 10 \text{ м/с}^2 \cdot (1 \text{ с})^2 = 0,201 \text{ м};$$

$$\Delta x_3 = 10 \text{ м/с}^2 \cdot (1,001 \text{ с})^2 - 10 \text{ м/с}^2 \cdot (1 \text{ с})^2 = 0,02001 \text{ м}.$$

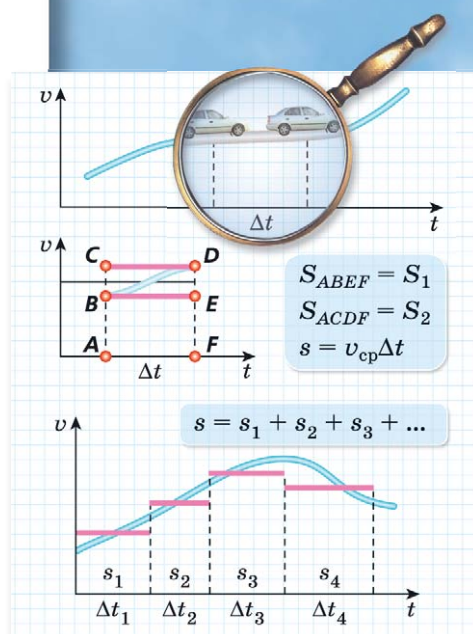
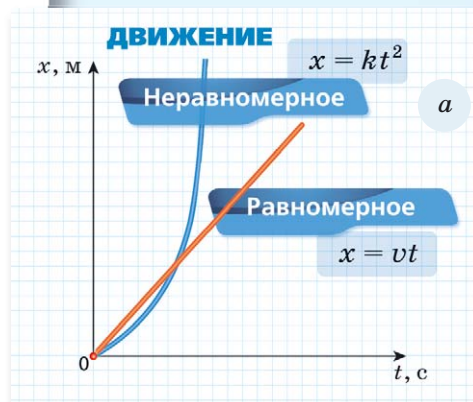
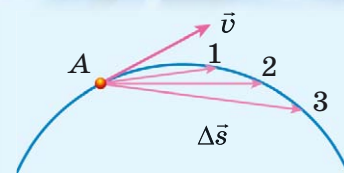
Согласно определению средней скорости

$$v_{\text{ср}1} = \frac{\Delta x_1}{\Delta t_1} = 21 \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad v_{\text{ср}2} = \frac{\Delta x_2}{\Delta t_2} = 20,1 \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad v_{\text{ср}3} = \frac{\Delta x_3}{\Delta t_3} = 20,01 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

При дальнейшем уменьшении промежутка времени средняя скорость тела приближается к его мгновенной скорости, которая в этом случае равна $v_{\text{мгн}} = 20,0 \text{ м/с}$.

ГРАФИК СКОРОСТИ И ЗНАЧЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ Как при равномерном, так и при неравномерном прямолинейном движении модуль перемещения равен *площади под графиком скорости*. При этом не имеет значения, как изменяется скорость, важно, чтобы направление вектора скорости на данном отрезке времени не изменялось.

Построим график зависимости скорости от времени и разобьём весь интервал движения на отрезки Δt . Рассмотрим движение тела в отдельном промежутке времени Δt . Площадь фигуры S под графиком: $S_1 < S < S_2$ ($S_{ABEF} = S_1$, $S_{ACDF} = S_2$). Чем меньше Δt , тем меньше различаются площади S_1 и S_2 , т.е. движение приближается к равномерному, а площадь под графиком — к произведению высоты (мгновенной скорости) и основания (промежутка времени). Таким образом, площадь численно равна перемещению тела за время Δt . А площадь под всем графиком равна сумме площадей для каждого промежутка времени, т.е. *значение перемещения при неравномерном движении численно равно площади под графиком скорости*.



ВОПРОСЫ:

- Как вычисляется средняя путевая скорость?
- Какую скорость называют мгновенной?
- Как по графику скорости можно определить значение перемещения?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Какие физические величины используют при описании равнопеременного движения.
- Что собой представляет уравнение равнопеременного движения.
- Что такое среднее ускорение.

ВСПОМНИТЕ:

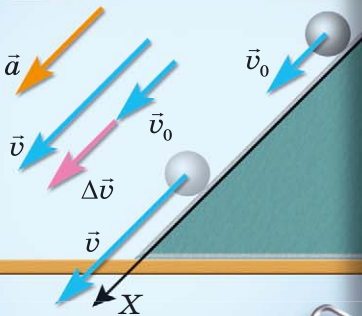
- Какое движение называют равнопеременным?
- Что такое линейная функция и как выглядит её график?
- Что такое парабола?

Если обозначить величины: скорость тела в начальный момент времени — $\vec{v}_0$, время движения — t , конечная скорость — $\vec{v}$, то ускорение рассчитывают по формуле

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}.$$

УСКОРЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ

$$a_x > 0$$



В Международной системе единиц (СИ) за единицу ускорения принимают ускорение такого равнопеременного прямолинейного движения, при котором скорость движущегося тела за 1 с изменяется на 1 м/с. Эту единицу (1 метр на секунду в квадрате) обозначают 1 м/с²:

$$\frac{1 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{1 \text{ с}} = 1 \frac{\text{м}}{\text{с} \cdot \text{с}} = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

РАВНОПЕРЕМЕННОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ

При неравномерном движении модуль скорости изменяется. Если мгновенная скорость движущегося тела растёт, то движение называют ускоренным; если мгновенная скорость уменьшается, то движение называют замедленным.

РАВНОУСКОРЕННОЕ И РАВНОЗАМЕДЛЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ

Если за любые одинаковые промежутки времени скорость тела увеличивается на одно и то же значение, такое движение называют **равноускоренным**. При равноускоренном прямолинейном движении не только сама скорость, но и проекции вектора скорости на выбранную ось за любые равные промежутки времени изменяются на одно и то же значение. Если за любые одинаковые промежутки времени скорость тела уменьшается на одно и то же значение, то такое движение называют **равнозамедленным**. Движение, при котором скорость тела за любые равные промежутки времени изменяется (увеличивается или уменьшается) на одно и то же значение, называют **равнопеременным**.

УСКОРЕНИЕ В качестве примера рассмотрим равноускоренное движение двух автомобилей. Один из них, трогаясь из состояния покоя, за 3 с разгоняется до скорости 90 км/ч, а другой за то же время — до 75 км/ч. Говорят, что первый автомобиль движется с большим ускорением, чем второй.

Физическую величину, характеризующую быстроту изменения скорости тела, называют **ускорением**.

Если рассматриваемый промежуток времени, в течение которого изменялась скорость, очень мал, то можно говорить об ускорении тела в некоторый определённый момент времени.

Ускорение — векторная физическая величина, равная отношению изменения вектора скорости $\Delta \vec{v}$ к малому промежутку времени Δt , за которое произошло это изменение:

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}. \quad (1)$$

При равнопеременном движении ускорение будет постоянным, и в формуле (1) может использоваться любой интервал времени Δt .

НАПРАВЛЕНИЕ ВЕКТОРА УСКОРЕНИЯ И ЗНАК ПРОЕКЦИИ

УСКОРЕНИЯ ПРИ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ ДВИЖЕНИИ Направим ось X по направлению движения. Так как направления оси и вектора скорости совпадают, то значение проекции скорости на эту ось будет положительным и равным модулю вектора скорости.

Если тело ускоряется, т. е. модуль скорости движения тела возрастает, то направление вектора ускорения со-

впадает с направлением движения тела (с направлением вектора скорости). Если тело замедляет своё движение, т.е. модуль скорости движения тела уменьшается, то в этом случае направление вектора ускорения противоположно направлению движения тела (направлению вектора скорости).

При равнопеременном прямолинейном движении не только скорость, но и проекции вектора скорости за любые равные промежутки времени изменяются на одно и то же значение:

$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}. \quad (2)$$

Если $v_x > v_{0x}$, то тело движется **равноускоренно**, если же $v_x < v_{0x}$, — **равнозамедленно**. При этом знак проекции ускорения a_x может быть как положительным, так и отрицательным.

СКОРОСТЬ РАВНОПЕРЕМЕННОГО ДВИЖЕНИЯ Преобразовав формулу (2) для вычисления проекции ускорения при равнопеременном движении, можно получить формулу для нахождения *проекции скорости* в любой момент времени:

$$v_x = v_{0x} + a_x t. \quad (3)$$

Если в начальный момент тело покоилось ($\vec{v}_0 = 0$), то формула (3) принимает вид

$$v_x = a_x t. \quad (4)$$

Функция $v_x = v_{0x} + a_x t$ линейная. Её аргументом является время t , угловой коэффициент численно равен a_x , а свободный член — это v_{0x} .

Графиком данной функции является прямая линия, расположение которой по отношению к осям координат определяется значениями a_x и v_{0x} .

Пусть направление оси OX совпадает с направлением скорости тела в начальный момент времени. Если скорость тела увеличивается, то направление вектора ускорения совпадает с направлением вектора скорости, и проекции в формуле (3) можно заменить модулями соответствующих векторов:

$$v = v_0 + at.$$

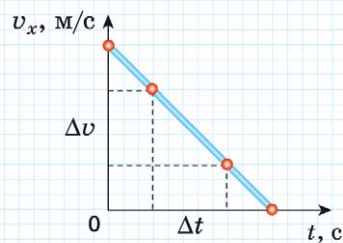
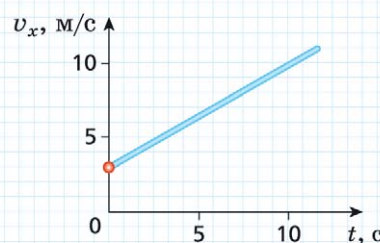
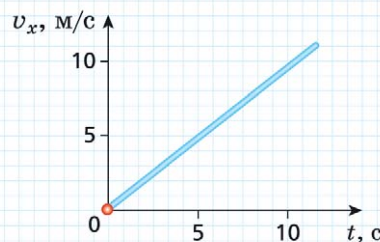
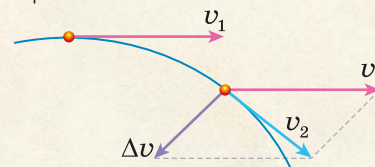
Если тело, имеющее скорость $\vec{v}_0$ в момент времени $t = 0$, начинает замедлять своё движение, его ускорение будет направлено в сторону, противоположную направлению движения.

Если ось OX по-прежнему направлена по направлению движения тела, то проекция ускорения будет *отрицательна* и можно записать:

$$a_x = -|a|.$$

Тогда модуль скорости в момент времени t можно найти по формуле $v = v_0 - at$.

Поскольку при криволинейном движении направление скорости изменяется, такое движение является ускоренным. Направление ускорения при таком движении не совпадает с направлением скорости.



Если обозначить величины: проекция скорости тела в начальный момент времени — v_{0x} , время движения — t , проекция ускорения — a_x , то проекцию конечной скорости рассчитывают по формуле

$$v_x = v_{0x} + a_x t.$$

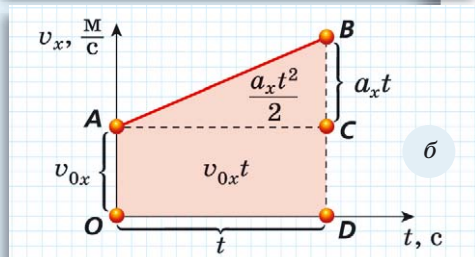
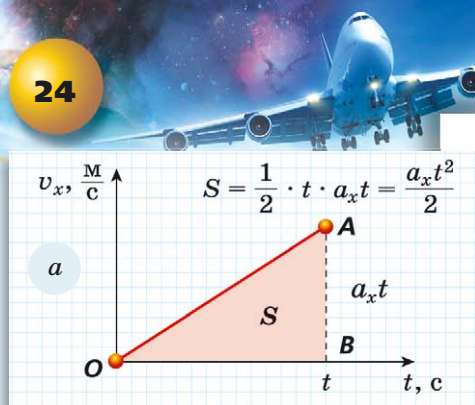


График зависимости скорости от времени



Если обозначить величины: проекция скорости тела в начальный момент времени — v_{0x} , время движения — t , проекция ускорения — a_x , то проекцию перемещения s_x тела, движущегося равнопеременно, рассчитывают по формуле

$$s_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}.$$

Проекцию перемещения тела, движущегося равноускоренно без начальной скорости, рассчитывают по формуле

$$s_x = \frac{a_x t^2}{2}.$$

Повторяя предыдущие рассуждения о направлении оси X , векторов скорости и ускорения, проекции в формуле (8) можно заменить модулями соответствующих векторов. Тогда для равноускоренного движения получим

$$s = v_0 t + \frac{at^2}{2},$$

а для равнозамедленного движения —

$$s = v_0 t - \frac{at^2}{2}.$$

ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ТЕЛА ПРИ РАВНОПЕРЕМЕННОМ ДВИЖЕНИИ

Если начальная скорость тела равна нулю и тело движется равноускоренно, то график зависимости проекции скорости от времени будет таким, как изображено на рисунке **а**. Для определения значения перемещения за время t необходимо найти площадь треугольника под графиком. Так как полученный треугольник прямоугольный, а отрезок AB является его высотой, то можно записать, что площадь треугольника равна:

$$S = \frac{1}{2} OB \cdot AB.$$

Длина отрезка OB равна значению времени t . Длина отрезка AB равна значению скорости v , которую приобретёт тело, двигаясь в течение этого времени с ускорением a . Учитывая, что $v_{0x} = 0$, можно записать:

$$v_x = a_x t.$$

Тогда получаем, что

$$S = \frac{1}{2} t a_x t = \frac{1}{2} a_x t^2, \text{ или } s_x = \frac{a_x t^2}{2}. \quad (5)$$

Следовательно, значение проекции перемещения пропорционально квадрату времени.

Если тело движется равноускоренно, то направления векторов перемещения и ускорения совпадают. Если ось OX направлена по направлению движения тела, то значения модулей векторов перемещения, скорости и ускорения равны значениям их проекций. Поэтому мы можем записать:

$$s = \frac{at^2}{2}. \quad (6)$$

Если начальная скорость тела не равна нулю и тело движется равноускоренно, то график зависимости проекции скорости от времени будет таким, как изображено на рисунке **б**. В этом случае, как и в предыдущем, значение перемещения будет равно площади фигуры под графиком.

Видно, что площадь фигуры $OABD$ равна сумме площадей треугольника ABC и прямоугольника $OACD$. Площадь прямоугольника равна произведению длин его сторон:

$$S_1 = v_{0x} t.$$

Площадь треугольника, как и в предыдущем случае, равна:

$$S_2 = \frac{a_x t^2}{2}.$$

Следовательно,

$$s_x = S_1 + S_2, \quad s_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}. \quad (7)$$

УРАВНЕНИЕ РАВНОПЕРЕМЕННОГО ДВИЖЕНИЯ Из формулы (7) можно найти положение (координату) тела в любой момент времени. Учítывая, что

$$s_x = x - x_0 \text{ и } s_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2},$$

получим

$$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}. \quad (8)$$

В полученной формуле проекции x_0 , v_{0x} и a_x могут быть как положительными, так и отрицательными.

Если рассматривается движение на плоскости, то рассматриваются проекции на оси OX и OY . Тогда при координатном способе описания движения получаем систему линейных уравнений

$$\begin{cases} x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2} \\ y = y_0 + v_{0y}t + \frac{a_y t^2}{2} \end{cases}$$

График зависимости координаты тела от времени представляет собой параболу. Из уравнений (2) и (8) с учётом того, что $s_x = x - x_0$, можно получить уравнение, связывающее проекцию перемещения s_x с проекциями начальной скорости v_{0x} , конечной скорости v_x и ускорения a_x :

$$s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}. \quad (9)$$

Если $v_{0x} = 0$, то можно записать:

$$s_x = \frac{v_x^2}{2a_x}. \quad (10)$$

Тогда $v_x = \sqrt{2a_x s_x}$, или $a_x = \frac{v_x^2}{2s_x}$.

СРЕДНЕЕ УСКОРЕНИЕ В качестве примера неравномерного движения, в котором ускорение не является постоянным, рассмотрим движение автомобиля в течение некоторого отрезка времени от одного перекрёстка до другого. Очевидно, что его скорость изменяется в разные моменты времени по-разному. Где-то автомобиль ускоряется и его скорость увеличивается по модулю, где-то автомобиль совершает поворот, при этом его скорость уменьшается по модулю и меняется по направлению и т.д.

Пусть за время $\Delta t = t_2 - t_1$ скорость изменилась на величину $\Delta \vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$. Тогда величину

$$\vec{a}_{\text{ср}} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$

называют **средним ускорением**. Подобно тому как средняя скорость показывает, какой путь в среднем проходит тело в единицу времени, среднее ускорение показывает, как в среднем изменяется скорость тела в единицу времени.

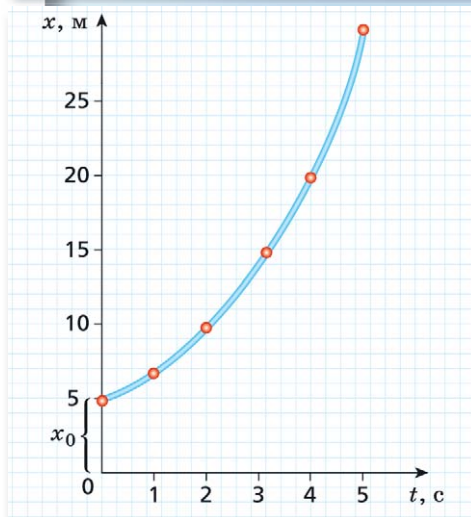
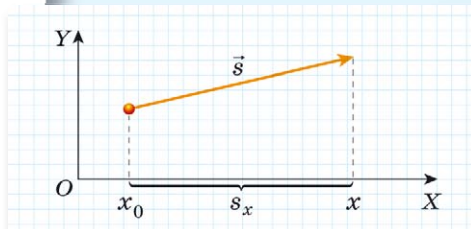
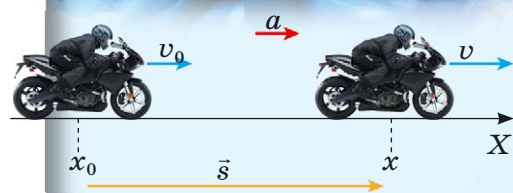
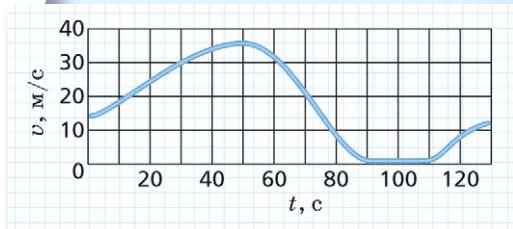


График зависимости координаты тела от времени



ВОПРОСЫ:

- Как направление вектора ускорения зависит от характера движения тела?
- Какими способами можно найти скорость и перемещение тела при равнопеременном движении?
- Как построить график зависимости координаты тела от времени при равнопеременном движении?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

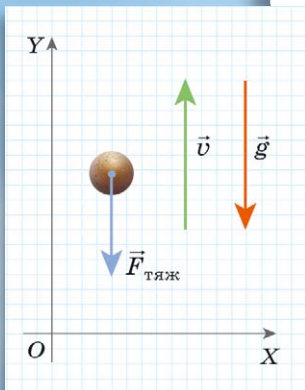
- Как описывается движение тела, брошенного вертикально вверх.
- Как описывается движение тела, брошенного под углом к горизонту.

ВСПОМНИТЕ:

- Как вычислить скорость и перемещение прямолинейного равнопеременного движения?
- Как найти проекции вектора на координатные оси?

Свободное падение тел можно продемонстрировать при помощи трубки Ньютона — стеклянной трубки, один конец которой закрыт, а другой снабжён краном, через который из трубки можно откачать воздух.

Не откачивая воздух, поместим в трубку пёрышко, кусочек пробки и дробишку. Если трубку резко перевернуть, все три предмета упадут на дно в разные моменты времени. Теперь откачаем из трубки воздух. Если её быстро перевернуть, все три предмета упадут на дно одновременно, так как все падающие вниз тела движутся с одинаковым ускорением.



ДВИЖЕНИЕ С УСКОРЕНИЕМ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ

Открытие того, что все тела в отсутствие сопротивления воздуха падают на поверхность Земли с одинаковым ускорением, принадлежит Г. Галилею. Один из самых распространённых видов равнопеременного движения — движение с ускорением свободного падения.

СВОБОДНОЕ ПАДЕНИЕ Движение тела только под действием силы тяжести называется **свободным падением**. Говорить о свободном падении тела можно только в том случае, если сила сопротивления воздуха много меньше силы тяжести и ею можно пренебречь, а также если отсутствует воздействие со стороны других тел. Ещё со времён Аристотеля считалось, что ускорение, сообщаемое Землёй телу, зависит от массы тела. Галилею опытным путём удалось доказать, что это не так, что свободное падение тел искажается из-за сопротивления воздуха. В вакууме все тела, падающие под действием силы тяжести, движутся с одинаковым ускорением — **ускорением свободного падения**. Ускорение свободного падения $\vec{g}$ всегда направлено вертикально вниз и вблизи поверхности Земли приблизительно равно $9,8 \text{ м/с}^2$.

ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ВЕРТИКАЛЬНО ВВЕРХ

Для того чтобы тело начало своё движение вверх, на него в течение короткого промежутка времени действуют с некоторой силой и сообщают ему начальную скорость $\vec{v}_0$. После этого тело движется вверх, постепенно замедляя своё движение, затем на мгновение останавливается, достигнув наибольшей высоты, и, наконец, начинает падать вниз. Если пренебречь сопротивлением воздуха, то можно сказать, что на тело в течение всего времени его движения действует *только сила тяжести*.

При движении тела вверх направление начальной скорости $\vec{v}_0$ противоположно направлению силы тяжести и направлению ускорения свободного падения, поэтому модуль скорости тела уменьшается, т.е. тело движется *равнозамедленно*. При этом скорость тела $\vec{v}$ в момент времени t равна:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{g}t. \quad (1)$$

Направим ось OY вертикально вверх. Тогда

$$v_{0y} = v_0 \text{ и } g_y = -g = -9,8 \text{ м/с}^2.$$

Запишем теперь уравнение (1) для проекции скорости v_y :

$$v_y = v_{0y} + g_y t, \text{ или } v_y = v_{0y} - gt. \quad (2)$$

С течением времени модуль скорости движения тела уменьшается, и в момент времени t_1 его скорость становится равной нулю. Тело останавливается, достигнув наибольшей высоты.

После этого под действием силы тяжести тело начинает своё движение вниз. Это движение является *равноускоренным*, поэтому значение скорости будет увеличиваться. При этом направление скорости и направление оси OY противоположны, поэтому проекция скорости v_y для времени $t > t_1$ отрицательна.

Так как движение тела, брошенного вертикально вверх, является равнопеременным, зависимость проекции его перемещения от времени описывается формулой

$$s_y = v_{0y}t + \frac{g_y t^2}{2}.$$

Поскольку ускорение свободного падения и ось направлены противоположно, проекция ускорения свободного падения отрицательна и можно записать:

$$s_y = v_{0y}t - \frac{gt^2}{2}. \quad (3)$$

Зависимость координаты тела от времени, т.е. его уравнение движения, в этом случае

$$y = y_0 + v_{0y}t - \frac{gt^2}{2}. \quad (4)$$

МАКСИМАЛЬНАЯ ВЫСОТА ПОДЪЁМА ТЕЛА, БРОШЕННОГО

ВЕРТИКАЛЬНО ВВЕРХ

Очевидно, что чем большую начальную скорость мы сообщим телу, брошенному вертикально вверх, тем на большую высоту оно поднимется. Определим, чему равна максимальная высота подъёма h .

Очевидно, эта высота соответствует моменту остановки тела, т.е. времени t_1 (рис. *a*). Тогда по формуле (2)

$$0 = v_{0y} - gt_1, \text{ или } t_1 = \frac{v_{0y}}{g}.$$

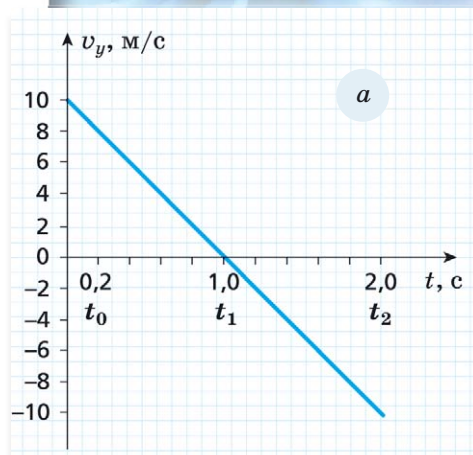
Максимальную высоту подъёма тела можно определить из уравнения движения (4), подставив в него найденное значение t_1 . Нас интересует, на какую высоту поднялось тело по сравнению с его начальным положением. Совместим начало координат с начальным положением тела. В этом случае $y_0 = 0$. Тогда

$$h = y_0 + v_{0y}t_1 - \frac{gt_1^2}{2} = \frac{v_{0y}^2}{g} - \frac{v_{0y}^2}{2g} = \frac{v_{0y}^2}{2g}. \quad (5)$$

Таким образом, *максимальная высота подъёма тела, брошенного вертикально вверх, пропорциональна квадрату его начальной скорости.*

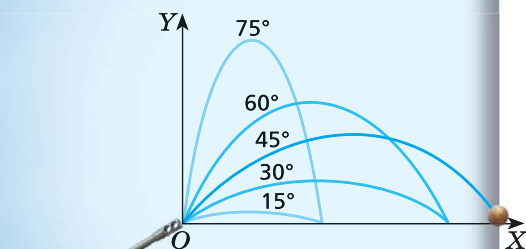
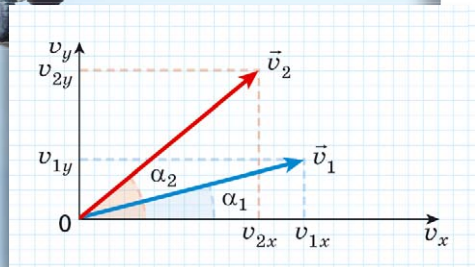
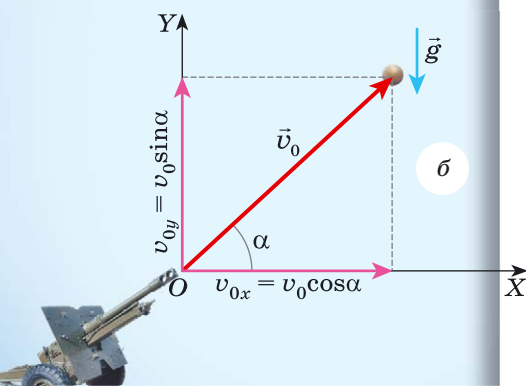
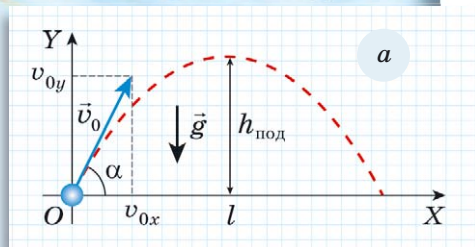
ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ПОД УГЛОМ К ГОРИЗОНТУ

Ранее интерес к изучению движения тел в поле тяжести Земли диктовался потребностями военной науки — баллистики: необходимостью определять дальность полёта снарядов, выпущенных катапультами, а в более поздние времена — развитием теории полёта пушечных ядер.



Согласно уравнению (5) наибольшая высота подъёма тела, брошенного вертикально вверх, зависит только от его начальной скорости и не зависит ни от его массы, ни от его формы. Важно понимать, что это справедливо только в случае, если мы не учитываем сопротивление воздуха. В вакууме это соотношение выполняется строго. В реальных же условиях из-за сопротивления воздуха максимальная высота подъёма тела будет меньше значения в формуле (5).





При одном и том же значении начальной скорости значение проекции v_y будет тем больше, чем больше угол α . При этом с увеличением угла α значение проекции v_x уменьшается.

Пусть тело, движущееся под действием силы тяжести, имеет начальную скорость, направленную под некоторым углом к горизонту. Такое движение можно разбить на два этапа.

На первом этапе при движении от начала траектории до точки, соответствующей наибольшей высоте подъёма, скорость тела уменьшается. На втором этапе тело будет равноускоренно двигаться вниз.

Рассмотрим движение тела, брошенного под углом α к горизонту, в координатной плоскости XOY (рис. а). Направим ось OX горизонтально, а ось OY вертикально. Начало координат соответствует точке бросания. Пусть при этом точка бросания тела и точка его падения лежат на горизонтальной прямой. Соппротивлением воздуха пренебрегаем. Введём следующие обозначения: $\vec{v}_0$ — начальная скорость, проекции скорости $\vec{v}_0$ на оси OX и OY — v_{0x} и v_{0y} соответственно, проекции ускорения свободного падения $\vec{g}$ на оси OX и OY — g_x и g_y соответственно, $h_{\text{под}}$ — максимальная высота подъёма тела, l — дальность полёта. Поскольку ускорение свободного падения постоянно, уравнения движения тела, брошенного под углом к горизонту, будут выглядеть так:

$$\begin{aligned} x &= x_0 + v_{0x}t + \frac{g_x t^2}{2}, \\ y &= y_0 + v_{0y}t + \frac{g_y t^2}{2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Из рисунка б видно, что

$$g_x = 0, \quad g_y = -g, \quad (7)$$

$$v_{0x} = v_0 \cos \alpha, \quad (8)$$

$$v_{0y} = v_0 \sin \alpha.$$

Поэтому можно записать:

$$x = v_0 \cos \alpha \cdot t, \quad (9)$$

$$y = v_0 \sin \alpha \cdot t - \frac{gt^2}{2}. \quad (10)$$

ВЫСОТА ПОДЪЁМА ТЕЛА, БРОШЕННОГО ПОД УГЛОМ

К ГОРИЗОНТУ

Рассмотрим движение тела вдоль оси OY . Тело при подъёме движется равнозамедленно, и его скорость в момент времени t можно найти по формуле $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{g}t$. Получаем, что

$$v_y = v_{0y} - gt. \quad (11)$$

Обозначим максимальную высоту подъёма тела через $h_{\text{под}}$, а момент времени, в который тело достигло наибольшей высоты, через $t_{\text{под}}$. Поскольку в наивысшей точке траектории $v_y = 0$, то

$$t_{\text{под}} = \frac{v_{0y}}{g} = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}. \quad (12)$$

Воспользовавшись уравнением движения тела, получим

$$h_{\text{под}} = v_{0y} t_{\text{под}} - \frac{gt_{\text{под}}^2}{2}. \quad (13)$$

Подставив уравнение (12) в выражение (13), учитывая формулу (8), получим

$$h_{\text{под}} = \frac{v_{0y}^2}{2g} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}. \quad (14)$$

ДАЛЬНОСТЬ ПОЛЁТА ТЕЛА, БРОШЕННОГО ПОД УГЛОМ

К ГОРИЗОНТУ Учитывая, что $g_x = 0$, можно утверждать, что характер движения тела в проекции на ось ОХ является равномерным. Дальность полёта l_{max} мяча может быть определена из уравнения движения (9) по формуле $l_{\text{max}} = v_0 t_{\text{п}} \cos \alpha$, где $t_{\text{п}}$ — время полёта от начала движения до падения. Время полёта можно определить, зная, что в момент падения координата тела $y = 0$, т.е. с учётом формулы (10):

$$v_0 t_{\text{п}} \sin \alpha - \frac{gt_{\text{п}}^2}{2} = 0.$$

Решая данное квадратное уравнение, получаем два корня: $t_{\text{п}} = 0$ (соответствует начальному положению мяча) и $t_{\text{п}} = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}$.

Как следует из формулы (12), при отсутствии сопротивления воздуха время, затраченное телом на подъём, $t_{\text{под}}$ составляет ровно половину всего времени движения тела, т.е. оно равно времени, которое проходит от момента, когда тело достигает максимальной высоты, до момента падения тела. Таким образом,

$$l_{\text{max}} = \frac{2v_0^2 \sin \alpha \cdot \cos \alpha}{g}. \quad (15)$$

Наибольшая дальность полёта тела, брошенного под углом к горизонту, соответствует углу $\alpha = 45^\circ$.

ТРАЕКТОРИЯ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ПОД УГЛОМ К ГОРИЗОНТУ

Для того чтобы определить форму траектории тела, брошенного под углом к горизонту, необходимо найти, как зависит координата y от координаты x , т.е. зависимость $y(x)$. Для этого надо исключить время t из уравнений (9) и (10). Из уравнения (9) находим:

$$t = \frac{x}{v_0 \cos \alpha}.$$

Подставляем полученное выражение в уравнение (10):

$$y = x \frac{v_0 \sin \alpha}{v_0 \cos \alpha} - \frac{gx^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} = x \operatorname{tg} \alpha - \frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} x^2.$$

Если обозначить $\operatorname{tg} \alpha = c$ и $-\frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} = b$, то получим

$$y = bx^2 + cx. \quad (16)$$

Полученное уравнение является уравнением параболы, ветви которой направлены вниз, поскольку $b < 0$.

Рассмотрим движение тела, брошенного горизонтально с некоторой высоты. Тогда

$$v_x = v_0, \quad x = v_0 t;$$

$$v_{0y} = 0, \quad v_y = -gt;$$

$$y = y_0 + v_{0y}t - \frac{gt^2}{2};$$

$$y_0 = h_0;$$

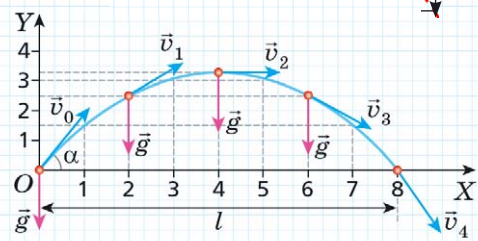
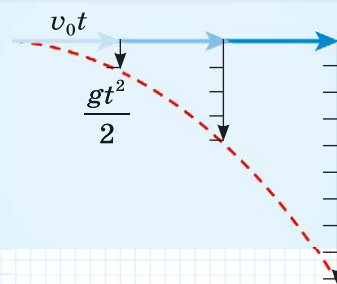
$$y = h_0 - \frac{gt^2}{2}.$$

Время t , за которое тело, брошенное горизонтально, достигнет поверхности Земли ($y = 0$), можно найти при помощи формулы (2):

$$h_0 = \frac{gt^2}{2}, \quad \text{откуда } t = \sqrt{\frac{2h}{g}}.$$

Дальность полёта при этом составит $l = v_0 t$, или

$$l = v_0 \sqrt{\frac{2h}{g}}.$$



ВОПРОСЫ:

● Как записывается уравнение движения тела, брошенного вертикально вверх? брошенного под углом к горизонту?

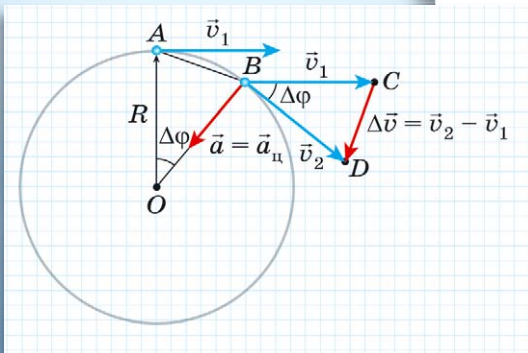
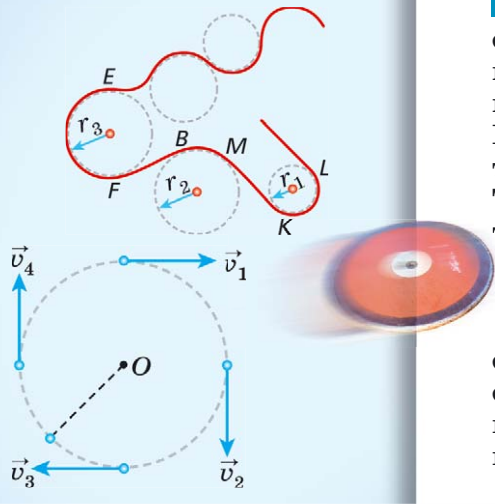
● Как найти максимальную высоту подъёма тела, брошенного вертикально вверх? брошенного под углом к горизонту?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как направлена мгновенная скорость тела и его ускорение при равномерном движении по окружности.
- Какие физические величины характеризуют движение тела по окружности.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое касательная к окружности?
- Что такое равномерное и неравномерное движение?
- Как найти ускорение тела?



$$\vec{v}_A \perp OA, \vec{v}_B \perp OB \Rightarrow \angle AOB = \angle CBD = \Delta\varphi.$$

$\triangle AOB \sim \triangle CBD$ как два равнобедренных треугольника с одинаковым углом в вершине.

ДВИЖЕНИЕ ПО ОКРУЖНОСТИ

Одним из простейших видов криволинейного движения является движение тела по окружности. Движение по любой криволинейной траектории можно приближённо представить как движение по дугам некоторых окружностей. Рассмотрим движение по окружности при постоянной по модулю скорости.

НАПРАВЛЕНИЕ ВЕКТОРА МГНОВЕННОЙ СКОРОСТИ Движение по окружности при неизменном модуле скорости называют **равномерным движением по окружности**. При таком движении в каждый момент времени скорость меняет своё направление: **мгновенная скорость тела в любой точке траектории направлена по касательной к траектории в этой точке.**

НАПРАВЛЕНИЕ ВЕКТОРА УСКОРЕНИЯ ТЕЛА, ДВИЖУЩЕГОСЯ ПО ОКРУЖНОСТИ

При движении по окружности с постоянной по модулю скоростью в каждый момент времени направление вектора скорости изменяется, поэтому это движение является движением с ускорением. Пусть R — радиус окружности. Обозначим скорость тела в точке A через $\vec{v}_1$ и скорость в точке B через $\vec{v}_2$. Тогда ускорение, с которым тело движется, можно найти по формуле

$$\vec{a} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{\Delta t}.$$

В числителе этой формулы стоит векторная физическая величина, представляющая собой изменение скорости $\Delta\vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$, а в знаменателе — скалярная. Поэтому направление вектора ускорения должно совпадать с направлением вектора изменения скорости $\Delta\vec{v}$. Изменение скорости $\Delta\vec{v}$ и, следовательно, вектор $\vec{a}$ направлены внутрь окружности. Так как нас интересует ускорение тела в точке A , то его положения в точках A и B следует брать настолько близкими друг к другу, чтобы дуга AB стягивалась в одну точку, а промежуток времени Δt стремился к нулю. В этом случае угол $\Delta\varphi$ между векторами $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$ также будет стремиться к нулю. Поскольку сумма углов треугольника BCD равна 180° , то угол между векторами $\Delta\vec{v}$ и $\vec{v}_1$ при $\Delta t \rightarrow 0$ равен 90° .

Ускорение тела, движущегося по окружности с постоянной по модулю скоростью, направлено по радиусу окружности к её центру и называется **центростремительным**. Оно обозначается $\vec{a}_ц$. Так как касательная к окружности перпендикулярна радиусу, проведённому в точке касания, следовательно, векторы скорости ($\vec{v}$) и центростремительного ускорения ($\vec{a}_ц$) перпендикулярны друг другу.

МОДУЛЬ ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНОГО УСКОРЕНИЯ ТЕЛА Пусть тело за время t переместилось из точки A в точку B , при этом вектор $\vec{OA}$ займёт положение вектора $\vec{OB}$, повер-

нувшись на угол $\Delta\varphi$. Треугольники AOB и DBC являются равнобедренными, так как $OA = OB = R$, а $CB = BD = v$. При этом $\angle AOB = \angle CBD = \Delta\varphi$ как углы, образованные взаимно перпендикулярными сторонами. Поэтому треугольники AOB и DBC подобны. Следовательно,

$$\frac{|\vec{v}_B - \vec{v}_A|}{AB} = \frac{|\vec{v}|}{R}.$$

Так как при $t \rightarrow 0$ $AB \approx \sphericalcap AB = |\vec{v}| \cdot t$, то

$$\frac{|\vec{v}_B - \vec{v}_A|}{|\vec{v}| \cdot t} = \frac{|\vec{v}|}{R}, \text{ или } \frac{|\vec{v}_B - \vec{v}_A|}{t} = \frac{|\vec{v}|^2}{R}.$$

Тогда можно записать:

$$|\vec{a}| = \frac{|\vec{v}|^2}{R}, \text{ или } a_{\text{ц}} = \frac{v^2}{R}. \quad (1)$$

ПЕРИОД И ЧАСТОТА Когда тело движется по окружности с постоянной по модулю скоростью, через определённые промежутки времени движение повторяется снова и снова. Время, в течение которого тело совершает один полный оборот, называют **периодом обращения**. Период обращения принято обозначать буквой T .

Число оборотов в единицу времени, которое совершает тело при своём движении по окружности, называют **частотой обращения** (ν). Частота обращения является величиной, обратной периоду обращения:

$$\nu = \frac{1}{T}. \quad (2)$$

ЛИНЕЙНАЯ И УГЛОВАЯ СКОРОСТИ Модуль скорости движения по окружности называют **линейной скоростью**. Для вычисления линейной скорости достаточно знать радиус окружности R и период или частоту обращения. Действительно, один полный оборот тело совершает за время, равное периоду обращения T . Путь, пройденный телом, в этом случае равен длине окружности: $l = 2\pi R$. Тогда можно записать:

$$v = \frac{2\pi R}{T},$$

или с учётом формулы (2)

$$v = 2\pi R\nu.$$

Движение точки по окружности можно характеризовать углом поворота радиуса, соединяющего движущуюся точку с центром окружности. **Угловой скоростью** ω называют отношение угла поворота φ радиуса, соединяющего движущуюся точку с центром окружности, ко времени поворота t :

$$\omega = \frac{\varphi}{t}.$$

Полный оборот по окружности составляет 2π рад, а время, затраченное на один оборот, — это период обращения. Поэтому

$$\omega = \frac{2\pi}{T}.$$

Если обозначить величины: модуль скорости движения тела по окружности — v , радиус окружности — R , то модуль центростремительного ускорения рассчитывают по формуле

$$a_{\text{ц}} = \frac{v^2}{R}.$$

Единица периода обращения в СИ — секунда.

Единица частоты — величина, обратная секунде, т.е. $1/\text{с}$, или с^{-1} .

Угол поворота обычно измеряют в радианах (рад). Единицей угловой скорости является радиан в секунду (рад/с).

ВОПРОСЫ:

- Какое направление имеют скорость тела и его ускорение при движении по окружности?
- Чему равен модуль центростремительного ускорения тела?
- Что такое линейная и угловая скорость?

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как решать задачи на равномерное прямолинейное движение.
- Как решать задачи на относительность движения.
- Как решать задачи на равнопеременное прямолинейное движение в поле тяжести Земли.
- Как решать задачи на вычисление линейной и угловой скорости при равномерном движении тела по окружности.

ЗАДАЧА 1 Со станции выехал автобус, движущийся прямолинейно со скоростью 36 км/ч. Через 10 мин в том же направлении выехал мотоциклист, движущийся со скоростью 20 м/с. На каком расстоянии от станции мотоциклист нагонит автобус? Через какое время это произойдет?

Дано:
 $v_1 = 36 \text{ км/ч}$
 $v_2 = 20 \text{ м/с}$
 $\Delta t = 10 \text{ мин}$

СИ
 10 м/с
 600 с

Решение:

Начало отсчёта координаты выберем на станции, а время будем отсчитывать от момента начала движения автобуса. Запишем зависимость координаты от времени для каждого из тел:

$$x_1 = v_1 t, \quad (1)$$

$$x_2 = v_2(t - \Delta t). \quad (2)$$

В момент начала обгона автобуса мотоциклистом их координаты равны: $x_1 = x_2$, т.е. $v_1 t = v_2(t - \Delta t)$.

Из последнего равенства находим искомое время:

$$t = \frac{v_2 \Delta t}{v_2 - v_1} = \frac{20 \cdot 600}{20 - 10} \text{ с} = 1200 \text{ с} = 20 \text{ мин}.$$

Из равенства (1) находим координату места встречи:

$$x = \frac{v_1 v_2 \Delta t}{v_2 - v_1} = \frac{10 \cdot 20 \cdot 600}{20 - 10} \text{ м} = 12 \text{ км}.$$

Ответ: $x = 12 \text{ км}$; $t = 20 \text{ мин}$ от момента начала движения автобуса.

ЗАДАЧА 2 Пловец, имеющий скорость относительно воды 1 м/с, должен переправиться на противоположный берег по кратчайшему пути. Сколько времени ему потребуется, если скорость течения реки 0,5 м/с, а ширина реки 50 м?

Дано:
 $v_{\text{отн}} = 1 \text{ м/с}$
 $u = 0,5 \text{ м/с}$
 $H = 50 \text{ м}$

$t = ?$

Решение:

Для того чтобы плыть по прямой, перпендикулярной линии берегов, пловец обязан учитывать снос течением и держать направление под некоторым углом к указанной прямой. Согласно закону сложения скоростей $\vec{v} = \vec{v}_{\text{отн}} + \vec{u}$.

По теореме Пифагора находим: $v = \sqrt{v_{\text{отн}}^2 - u^2}$. Следовательно, время переправы через реку

$$t = \frac{H}{v} = \frac{H}{\sqrt{v_{\text{отн}}^2 - u^2}}, \quad t = \frac{50}{\sqrt{1 - 0,25}} \text{ с} \approx 58 \text{ с}.$$

Ответ: $t \approx 58 \text{ с}$.



ЗАДАЧА 3 С балкона, находящегося на высоте 20 м над поверхностью земли, бросили вертикально вверх мяч с начальной скоростью 10 м/с. Через сколько времени мяч упадёт на землю?

Дано:

$$h = 20 \text{ м}$$

$$v_0 = 10 \text{ м/с}$$

t — ?

Решение:

Начало отсчёта координаты выберем на поверхности земли, а ось OY направим вертикально вверх. Поэтому в момент броска начальная координата мяча $y_0 = h$, а проекция начальной скорости v_0 положительна.

Запишем зависимость координаты y мяча от времени, учитывая, что проекция ускорения свободного падения на ось OY отрицательна:

$$y = h + v_0 t - gt^2/2.$$

В момент падения мяча $y = 0$, и для нахождения времени получаем квадратное уравнение

$$gt^2 - 2v_0 t - 2h = 0.$$

Физический смысл имеет только один корень:

$$t = \frac{v_0}{g} + \sqrt{\left(\frac{v_0}{g}\right)^2 + \frac{2h}{g}}.$$

Подставив числовые значения, получим

$$t = 1 + \sqrt{1 + 4} \text{ с} \approx 3,2 \text{ с}.$$

Ответ: $t \approx 3,2 \text{ с}$.

ЗАДАЧА 4 Чему равна линейная скорость точек земной поверхности на широте Санкт-Петербурга (60°) при суточном вращении Земли? Радиус Земли принять равным 6400 км.

Дано:

$$\alpha = 60^\circ$$

$$R = 6400 \text{ км}$$

$$T = 24 \text{ ч}$$

v — ?

СИ

$$6,4 \cdot 10^6 \text{ м}$$

$$8,64 \cdot 10^4 \text{ с}$$

Решение:

Угловая скорость вращения точек земной поверхности

$$\omega = 2\pi/T,$$

где T — период обращения Земли вокруг своей оси.

Радиус окружности, по которой вращаются точки земной поверхности на широте 60° :

$$r = R \cos 60^\circ = R/2.$$

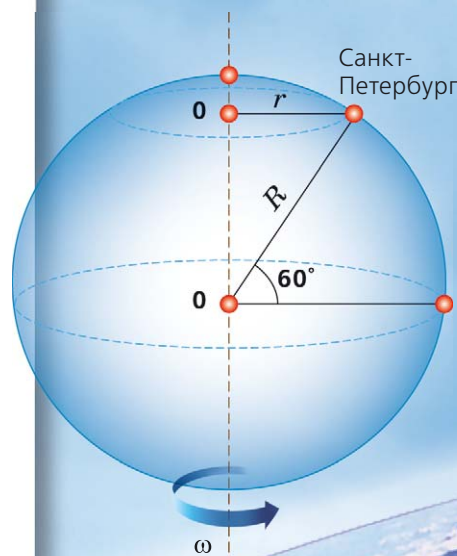
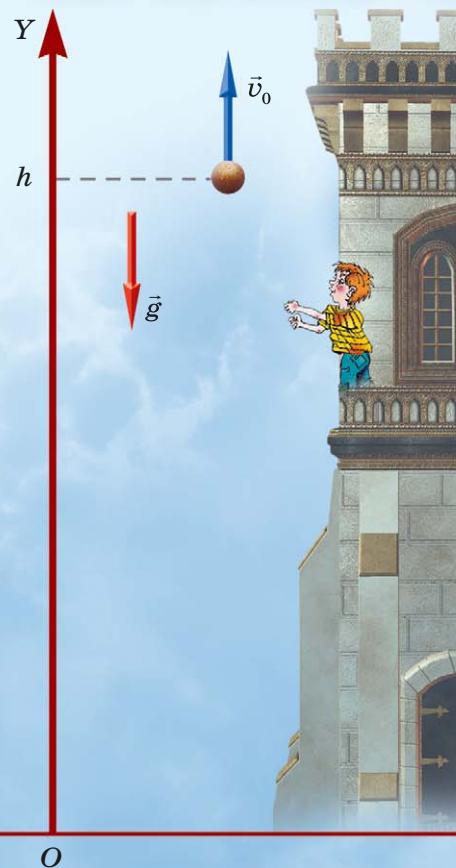
Учитывая связь между линейной и угловой скоростями, получаем

$$v = \omega r = \frac{2\pi R}{2T} = \frac{\pi R}{T}.$$

Подставив числовые значения, получим

$$v = \frac{3,14 \cdot 6,4 \cdot 10^7}{86,4 \cdot 10^3} \text{ м/с} \approx 233 \text{ м/с}.$$

Ответ: $v \approx 233 \text{ м/с}$.



ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

- Система координат, связанная с телом отсчёта, и часы для отсчёта времени образуют систему отсчёта, позволяющую определять положение движущегося тела в любой момент времени.
- Закон сложения скоростей: если тело движется относительно некоторой системы отсчёта K_1 со скоростью $\vec{v}_1$ и сама система отсчёта K_1 движется относительно другой системы отсчёта K_2 со скоростью $\vec{v}$, то скорость тела относительно системы отсчёта K_2 равна геометрической (векторной) сумме скоростей $\vec{v}_1$ и $\vec{v}$.
- Движение тела только под действием силы тяжести называют свободным падением. В вакууме все тела, падающие под действием силы тяжести, движутся с одинаковым ускорением — ускорением свободного падения.
- При движении по окружности мгновенная скорость тела в любой точке траектории направлена по касательной к траектории в этой точке, а ускорение тела, движущегося по окружности с постоянной по модулю скоростью, направлено по радиусу окружности к её центру.

Равномерное

ДВИЖЕНИЕ

Равнопеременное

$$v = 2\pi R\nu$$

$$v = \text{const}$$

$$\vec{v}$$

$$x = x_0 + v_x t$$

$$v_x = v_{0x} + a_x t$$

$$x = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$$

$$y = y_0 + v_{0y} t - \frac{g t^2}{2}$$

$$x = x_0 + v_{0x} t + \frac{g_x t^2}{2}$$

$$y = y_0 + v_{0y} t + \frac{g_y t^2}{2}$$

ПОДРОБНЕЕ...

Суорц К.Э. Необыкновенная физика обыкновенных явлений. Т. 1. / К. Э. Суорц. — М.: Наука, 1986.

Энциклопедия для детей. Т. 16. Физика. Ч. 1. Биография физики. Путешествие в глубь материи. Механическая картина мира. — М.: Аванта+, 2000.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

- Две системы отсчёта движутся друг относительно друга равномерно и прямолинейно. Может ли траектория одной и той же точки быть прямой в одной системе отсчёта и параболой в другой?
- Когда тело, брошенное вертикально вверх со скоростью v_0 , достигло высшей точки подъёма, из той же точки и с той же начальной скоростью бросили вверх второе тело. Чему равна относительная скорость тел в этот момент времени?

Научно-популярный физико-математический журнал «Квант»

<http://gotourl.ru/13725>

Портал журнала «Популярная механика»
<http://gotourl.ru/13726>



Глава 2

ДИНАМИКА

- СИЛА. ИЗМЕРЕНИЕ СИЛ
- ИНЕРЦИЯ. ПЕРВЫЙ ЗАКОН НЬЮТОНА
- ВЗАИМОСВЯЗЬ СИЛЫ И УСКОРЕНИЯ. ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА
- ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТЕЛ. ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА
- ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ
- ДВИЖЕНИЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ ТЯГОТЕНИЯ
- ВЕС ТЕЛА
- СИЛА ТРЕНИЯ
- РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ



РАЗДЕЛ I



МЕХАНИКА

КОРОТКО О ГЛАВНОМ...

Вся трудность физики состоит, по-видимому, в том, чтобы по явлениям движения распознать силы природы, а затем по этим силам объяснить остальные явления...

И. Ньютон

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Каков физический смысл введения понятия «сила».
- Как осуществляют сравнение и измерение сил.
- Какие виды сил изучают в механике.
- Что такое сила упругости.

ВСПОМНИТЕ:

- Как складывают векторные величины?
- Что такое динамометр?

Вся трудность физики состоит, по-видимому, в том, чтобы по явлениям движения распознать силы природы, а затем по этим силам объяснить остальные явления...

Сила проявляется единственно только в действии и по прекращении действия в теле не остаётся. Тело продолжает затем удерживать своё новое состояние вследствие одной только инерции. Происхождение приложенной силы может быть различное: от удара, от давления, от центростремительной силы.

И. Ньютон

СИЛА. ИЗМЕРЕНИЕ СИЛ

В инерциальной системе отсчёта изменение скорости тела может происходить только в результате его взаимодействия с другими телами. Об этом свидетельствуют многочисленные опыты. Для описания взаимодействия между телами вводится важнейшая физическая величина — сила.

СИЛА КАК МЕРА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЕЛ

Кроме Ньютона, разобраться в причинах движения тел пытались также и другие учёные. Ещё в XVII в. немецкий астроном И. Кеплер ввёл понятие силы как причины движения тел, однако он ошибочно связывал её со скоростью движения тела. Физически правильно понимал проявление силы Г. Галилей: он уже измерял силу вызванным ею ускорением, однако полностью отождествлял её с весом тела.

Прежде всего необходимо отчётливо представлять себе, что понятие силы обязательно относится к двум телам. Всегда существует тело, со стороны которого на данное тело действует та или иная сила. Например, сила тяжести действует на камень со стороны Земли; на гирьку, подвешенную на нити, действует сила упругости со стороны нити; на тормозящий автомобиль действует сила трения со стороны дороги и т. п.

Таким образом, *в современной физике под силой понимают физическую величину, являющуюся мерой взаимодействия тел.* Поэтому определение силы в механике должно отвечать на вопросы: как измерить силу и каковы её свойства?

СРАВНЕНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ СИЛ

Хотя сформулированное выше определение силы носит качественный характер, в нём отражено самое главное: силы обусловлены действиями на данное тело других тел.

Для того чтобы сопоставить силы, необходимо разработать процедуру их количественного измерения. Только в этом случае можно рассматривать силу как определённую физическую величину. При этом совершенно неважно, о каких силах идёт речь. Это может быть сила притяжения, действующая на Луну со стороны Земли, или сила, действующая на железный шарик со стороны магнита, это может быть и обычная мускульная сила.

Как показывает опыт, результат действия силы зависит не только от её величины, но и от направления. Это позволяет нам утверждать, что сила является векторной величиной. Поэтому можно привести следующее определение сравнения сил: **две любые силы равны по модулю и противоположно направлены, если при их одновременном действии тело в неподвижной или движущейся равномерно и прямолинейно системе отсчёта остаётся в покое или движется равномерно и прямолинейно.** В соответствии с этим определением появляется принципиальная возможность измерять силы, если одну

из них принять за эталон. В качестве эталона единицы силы обычно выбирают силу, с которой некоторая эталонная пружина при фиксированном растяжении действует на прикрепленное к ней тело. Пружина особенно удобна для измерения сил, потому что, будучи растянута (или сжата) на определённую длину, она действует на все тела с одной и той же силой $\vec{F}_0$. Эту силу можно выбрать в качестве эталонной.

Как вам известно из предыдущего курса физики, на практике для измерения сил используют определённую пружину, проградуированную на различные значения силы, — динамометр. При этом в пределах шкалы динамометра сила упругости прямо пропорциональна деформации пружины. Поэтому по величине деформации пружины можно судить о значении силы.

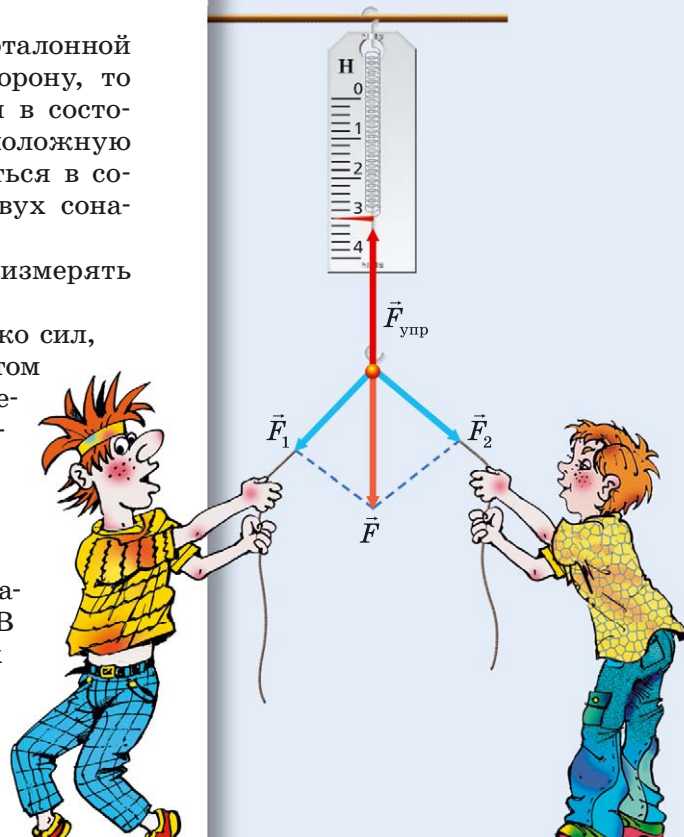
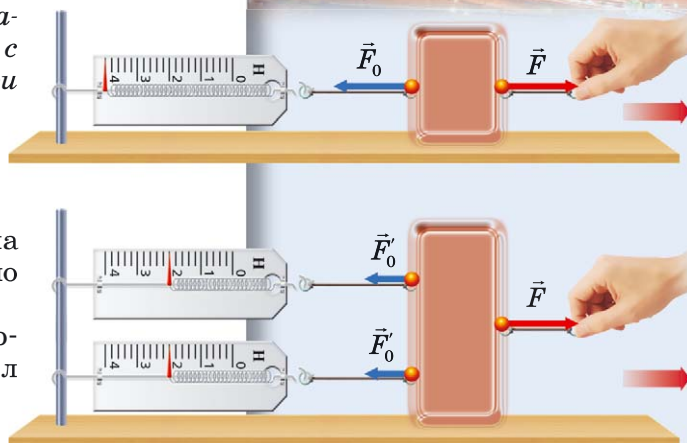
Если измеряемая сила $\vec{F}$ равна по модулю эталонной силе $\vec{F}_0$ и направлена в противоположную сторону, то под действием этих сил тело будет находиться в состоянии покоя. Если же направленная в противоположную сторону сила $\vec{F}$ такова, что тело будет находиться в состоянии покоя при одновременном действии двух сонаправленных эталонных сил $\vec{F}_0$, то $|\vec{F}| = 2|\vec{F}_0|$.

Таким образом, появляется возможность измерять силы, кратные эталону.

Если на тело одновременно действует несколько сил, не направленных вдоль одной прямой, то в этом случае силы необходимо складывать геометрически, поскольку они являются векторными величинами. При этом динамометром фактически измеряется равнодействующая указанных сил $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$ (в случае двух сил), т.е. $|\vec{F}_{\text{упр}}| = |\vec{F}|$.

СИЛЫ В МЕХАНИКЕ В механике не рассматривают природу сил, действующих между телами. В механике важно знать, от каких физических величин зависят те или иные силы. В частности, гравитационные силы и силы упругости зависят от расстояния между телами или частями одного и того же тела, а силы трения зависят от относительных скоростей тел.

Важно подчеркнуть, что модули и направления этих сил в рамках механики определяются экспериментально. Силы в механике условно можно разделить на *контактные* (сила трения, сила упругости) и *действующие на расстоянии* (сила тяжести). Контактные силы возникают при непосредственном соприкосновении тел. Гравитационные силы действуют в том числе между небесными телами, находящимися на огромных расстояниях друг от друга.



ВОПРОСЫ:

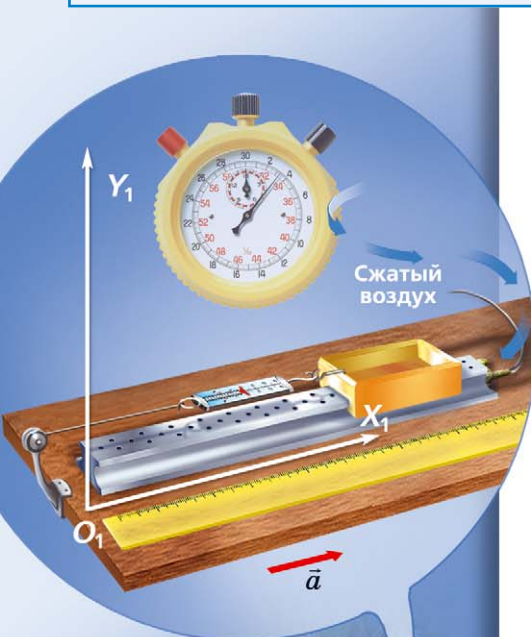
- Что понимают под термином «сила» в механике?
- Как осуществляют сравнение и измерение сил в механике?
- Какие виды сил изучают в механике?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое инерциальные и неинерциальные системы отсчёта.
- Как формулируется первый закон Ньютона.
- В чём заключается принцип относительности Галилея.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое движение по инерции?
- Что такое система отсчёта?
- В чём заключается относительность механического движения?



ИНЕРЦИЯ. ПЕРВЫЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Кинематика не может дать ответ на вопросы о причинах механического движения. Она лишь вооружает нас математическими приёмами описания того или иного вида движения. Физические причины механического движения раскрывает другой раздел механики — динамика. Фундамент динамики составляют законы Ньютона, которые опираются на большую совокупность опытных данных и наблюдений.

СИСТЕМА ОТСЧЁТА В МЕХАНИКЕ И ДВИЖЕНИЕ ПО ИНЕРЦИИ

В кинематике системы отсчёта совершенно эквивалентны, и предпочтение, отдаваемое той или иной системе отсчёта, определяется лишь соображениями простоты описания движения.

Начиная с Аристотеля, такой предпочтительной системой отсчёта выбиралась система отсчёта, связанная с Землёй. При этом существовало твёрдое убеждение в том, что естественным состоянием тела по отношению к Земле является состояние покоя, а для поддержания движения с постоянной скоростью необходимо внешнее воздействие.

И только благодаря гениальной интуиции Галилея и Ньютона был сделан решающий шаг, позволивший увидеть совершенно иную картину мира. Трудность этого шага заключалась в осознании того факта, что состояние движения с постоянной скоростью и состояние покоя являются естественными состояниями и в этом смысле эквивалентны.

Движение тела при отсутствии действия на него других тел называют **движением по инерции**. Осуществить такое движение в земных условиях практически невозможно. Вместе с тем условия движения тела могут быть приближены к почти идеальным, если воспользоваться специальным устройством. Сжатый воздух, выходящий из отверстий в направляющем рельсе, образует воздушную подушку, которая поддерживает во взвешенном состоянии лёгкую тележку-бегунок. При этом трение, действующее на тележку, весьма мало. Поэтому после лёгкого толчка тележка может долго двигаться с почти постоянной скоростью.

Если этот опыт провести в вагоне равномерно и прямолинейно движущегося поезда, то его результаты будут такими же, как и в условиях физической лаборатории.

Однако характер движения тележки существенно меняется, если опыт проводить в поезде, который начинает ускоренно двигаться. При этом тележка сама приходит в ускоренное движение относительно вагона в противоположную сторону. Если же тележка, установленная на дорожке с воздушной подушкой, была первоначально неподвижна относительно дорожки, то при торможении

поезда она начнёт двигаться относительно вагона вперёд с ускорением. Вместе с тем, относительно наблюдателя, стоящего на платформе, тележка будет продолжать двигаться равномерно и прямолинейно как при разгоне, так и при торможении поезда.

Таким образом, изображённые на рисунке **а** системы отсчёта $X_1O_1Y_1$ и $X_2O_2Y_2$ оказываются неравноправными. В отличие от кинематики, в динамике нарушается равноправие всех систем отсчёта.

ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ И НЕИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОТСЧЁТА

Системы отсчёта, в которых свободное тело, т.е. тело, не взаимодействующее с другими телами, сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, называют **инерциальными**. Например, система отсчёта, связанная с Землёй, и система отсчёта, связанная с равномерно и прямолинейно движущимся поездом, могут приближённо считаться инерциальными. В таких системах отсчёта выполняется закон инерции, как это и было продемонстрировано в опытах с тележкой, установленной на дорожке с воздушной подушкой: при изменении скорости поезда тележка по инерции продолжала движение с постоянной скоростью.

Системы отсчёта, в которых не выполняется закон инерции, называют **неинерциальными**. Примером неинерциальной системы отсчёта является ускоренно движущийся поезд.

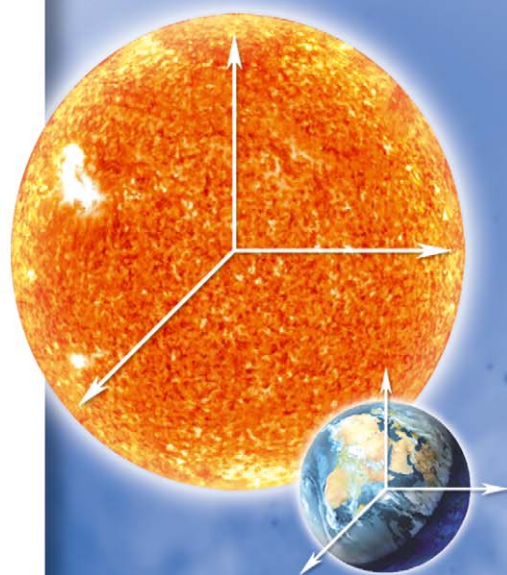
На самом деле система отсчёта, связанная с Землёй, не является строго инерциальной. Её неинерциальность связана главным образом с суточным вращением Земли.

ПЕРВЫЙ ЗАКОН НЬЮТОНА Закон инерции, первоначально сформулированный Галилеем, был определён Ньютоном в качестве фундамента, на котором построено учение о движении тел. В современной трактовке первый закон Ньютона имеет следующую формулировку: **существуют такие системы отсчёта, называемые инерциальными, в которых тело, не взаимодействующее с другими телами, сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения.**

Следует чётко понимать, что невозможно опытным путём выделить одну инерциальную систему относительно остальных. Это положение составляет содержание одного из важнейших принципов классической механики — **принципа относительности Галилея**. Законы движения тел во всех инерциальных системах отсчёта одинаковые.

Согласно рассуждениям Галилея невозможно, находясь в каюте корабля с завешенными шторами окнами, установить при помощи опытов, движется корабль равномерно и прямолинейно или находится в состоянии покоя. «...Во всех явлениях вы не обнаружите ни малейшего изменения и ни по одному из них не сможете установить, движется ли корабль или стоит неподвижно».

Систему отсчёта, связанную с Землёй, называют **геоцентрической**, а систему отсчёта, связанную с Солнцем, — **гелиоцентрической**. Известно, что при своём суточном вращении Земля за 1с поворачивается всего на 0,004 градуса. Поэтому для многих физических явлений и важных практических задач геоцентрическую систему можно считать инерциальной. Солнечная система за 1с поворачивается вокруг центра нашей Галактики на ничтожный угол, равный $6 \cdot 10^{-14}$ градуса. Поэтому гелиоцентрическую систему отсчёта с очень высокой степенью точности можно считать инерциальной. Она используется для решения задач небесной механики и космонавтики.



ВОПРОСЫ:

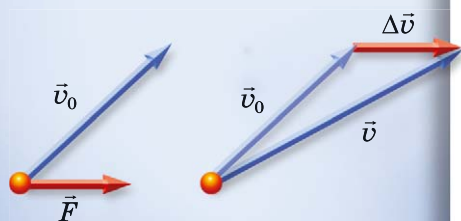
- Что такое движение по инерции?
- Какие системы отсчёта называют инерциальными?
- Как формулируется первый закон Ньютона?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как связаны между собой сила и ускорение.
- Что такое инертность тела.
- Как формулируется второй закон Ньютона.

ВСПОМНИТЕ:

- Что является причиной изменения скорости тела?
- Какова зависимость пути от времени при равноускоренном движении?
- Как формулируется первый закон Ньютона?



$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}, \quad \Delta \vec{v} \parallel \vec{F}.$$



Сила натяжения нити ускоряет движение тележки, а сила трения тормозит. Направление равнодействующей этих сил определяет направление ускорения, которое сообщается телу.

ВЗАИМОСВЯЗЬ СИЛЫ И УСКОРЕНИЯ. ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Ранее мы обсудили, как в принципе можно измерять силы. Мы также знаем, что в случае если на тело не действуют силы или равнодействующая всех сил, действующих на тело, равна нулю, то тело может либо покоиться, либо двигаться равномерно и прямолинейно, т.е. без ускорения. Если же на данное тело действуют с некоторой силой другие тела, то это приводит к изменению скорости тела, т.е. возникает ускорение.

СВЯЗЬ МЕЖДУ СИЛОЙ И УСКОРЕНИЕМ Установить взаимосвязь между силой, которая действует на тело, и ускорением, которое при этом возникает, можно только опытным путём. Простые наблюдения убеждают нас в том, что, чем большая сила действует на тело, тем быстрее изменяется его скорость, т.е. тем больше ускорение. Поэтому можно предположить, что ускорение, сообщаемое телу, прямо пропорционально действующей силе. Естественно также допустить, что направление ускорения совпадает с направлением силы, вызывающей это ускорение.

Изучение взаимосвязи силы и ускорения удобно проводить на дорожке с воздушной подушкой, описанной в предыдущих параграфах, поскольку в этих опытах обеспечивается движение тележки с достаточно малым трением.

При помощи пружинного динамометра соединим тележку с перекинутой через лёгкий блок нитью, к которой прикреплён груз. При движении тележки пружина динамометра будет растягиваться под действием силы натяжения нити, которая зависит от силы тяжести, действующей на груз: чем больше сила тяжести, тем сильнее натяжение нити и растяжение пружины.

Как показывает опыт, при движении тележки показания динамометра не меняются, т.е. сила натяжения $\vec{F}$ нити, действующая на тележку, постоянна.

Определить ускорение тележки через изменение её скорости за малый промежуток времени достаточно сложно. Но можно поступить иначе: измерить путь s , пройденный тележкой за определённое время t . Результаты измерений показывают, что путь, пройденный тележкой, пропорционален квадрату промежутка времени, прошедшего от начала движения: $s \sim t^2$. Последнее означает, что тележка движется равноускоренно.

Если начальная скорость тележки равна нулю, то

$$s = \Delta x = \frac{at^2}{2},$$

где $\Delta x = x_1 - x_0$ — изменение координаты тележки.

Следовательно, ускорение тела можно найти из формулы

$$a = \frac{2s}{t^2}.$$

Подвешивая грузы различной массы и определяя в каждом случае силы и ускорение, можно сделать следующий вывод: **ускорение, с которым движется тело, прямо пропорционально приложенной к этому телу силе:**

$$\vec{a} \sim \vec{F}.$$



ИНЕРТНОСТЬ. ВЗАИМОСВЯЗЬ МАССЫ И УСКОРЕНИЯ

Как показывают опыты, коэффициент пропорциональности между ускорением и силой оказывается разным для разных тел, но неизменным для данного тела. Иначе говоря, ускорение не только определяется действующей на тело силой, но и зависит от свойств самого тела.

Действительно, описанный выше опыт можно видоизменить, если сцепить вместе две одинаковые тележки. При этом оказывается, что данная сила $\vec{F}$ сообщает двум тележкам ускорение, значение которого в два раза меньше, чем в случае одной тележки.

Это означает, что коэффициент пропорциональности между ускорением и силой зависит от физического свойства тела, называемого **инертностью**. Чем больше инертность тела, тем меньшее ускорение испытывает тело под действием данной силы.

Физическую величину, количественно характеризующую инертные свойства тела, называют **инертной массой** или просто **массой** тела.

Таким образом, масса тела является мерой его инертности. Эта характеристика тела не зависит ни от действующей на него силы, ни от физических условий, в которых находится тело, например температуры окружающей среды, её агрегатного состояния, наличия электрических и магнитных полей и т.д. Как показывают многочисленные измерения, ускорения, приобретённые телами в результате действия на них силы, обратно пропорциональны их массам:

$$a \sim 1/m.$$

ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА Закон, устанавливающий связь ускорения с массой тела и действующей на него силой, называют **основным законом динамики** или **вторым законом Ньютона**:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}.$$

Из этой формулы видно, что направление ускорения тела всегда совпадает с направлением силы или равнодействующей сил, действующих на тело.

Второй закон Ньютона справедлив только в инерциальных системах отсчёта, однако указанная связь между силой и ускорением имеет универсальный характер и не зависит от конкретного выбора инерциальной системы отсчёта.

3а единицу силы в СИ принимают такую силу, которая сообщает телу массой 1 кг ускорение 1 м/с²:

$$1 \text{ Н} = 1 \text{ кг} \cdot 1 \text{ м/с}^2.$$

Если на тело не действуют силы или их векторная сумма равна нулю ($\vec{F} = 0$), то ускорение тела равно нулю ($\vec{a} = 0$) и, следовательно, скорость тела не меняется: $\vec{v} = \text{const}$. Однако это не означает, что первый закон Ньютона является следствием второго.

Второй закон Ньютона имеет следующую формулировку: ускорение тела прямо пропорционально действующей силе, приложенной к телу, и обратно пропорционально его массе:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}.$$

ВОПРОСЫ:

- Что является причиной ускоренного движения тела?
- Что такое инертность тела?
- Как формулируется второй закон Ньютона?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Есть ли физическое различие между действием и противодействием.
- Как формулируется третий закон Ньютона.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое взаимодействие тел?
- Как формулируется второй закон Ньютона?



ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТЕЛ. ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Мы уже знаем, что все силы, изучаемые в разделе «Механика», обладают общим свойством сообщать ускорения телам, на которые они действуют. Однако, кроме этого универсального свойства, силам присуща ещё одна особенность, заключающаяся в том, что любые действия тел друг на друга носят характер взаимодействия.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТЕЛ Можно привести самые разнообразные примеры взаимодействия тел. Представим себе, что один из конькобежцев, находящихся на гладком льду, пытается с помощью каната подтягивать в свою сторону другого конькобежца. При этом они начнут двигаться навстречу друг к другу. Первый конькобежец, действуя на второго, принуждает его воздействовать на себя.

Не менее показателен пример прыжков человека на батуте. Когда человек движется вниз, растягивая сетку батута, воздействие на него со стороны сетки всё увеличивается. В результате под действием силы упругости человека подбрасывает высоко вверх.

Эти и другие многочисленные примеры убеждают нас в том, что действия тел друг на друга носят характер *взаимодействия*.

Отметим, что взаимодействие тел наблюдается не только при их непосредственном контакте. В этом можно убедиться, проведя следующий опыт.

На плавающие рядом в воде деревянные дощечки осторожно опустим небольшие полосовые магниты и расположим их разноимёнными полюсами по отношению друг к другу. Отпустив магниты, мы сможем наблюдать, как дощечки приходят в движение и начинают сближаться.

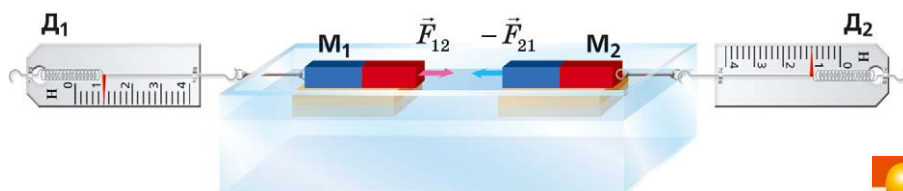
Рассмотренные выше опыты со всей очевидностью показывают, что *все силы возникают только парами, т.е. если одно тело действует на другое (действие), то второе тело, в свою очередь, действует на первое (противодействие)*. Такое деление тел является чисто условным, между ними нет какого-либо принципиального различия.

Таким образом, силы взаимодействия совершенно равноправны и всегда имеют одинаковую физическую природу.

В частности, в рассмотренном выше примере взаимодействия двух конькобежцев один из них воздействует на другого посредством силы упругости натянутого каната. При этом сила, действующая на первого конькобежца, также является силой упругости.

ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Установим опытным путём, как количественно связаны между собой силы взаимодействия двух тел. Эти опыты лучше проводить с помощью дорожки с воздушной подушкой или использовать плавающие на поверхности воды деревянные дощечки, так как в обоих случаях сила трения достаточно мала. Технически проще провести опыты с деревянными дощечками, на которых закреплены полосовые магниты M_1 и M_2 .



Посредством пружинных динамометров D_1 и D_2 с помощью нити соединим магниты со стенками сосуда. В положении равновесия тел показания динамометров оказываются одинаковыми. При этом динамометр D_1 измеряет модуль силы $\vec{F}_{12}$, действующей на первый магнит со стороны второго, а динамометр D_2 — модуль силы $\vec{F}_{21}$, действующей на второй магнит со стороны первого.

Таким образом, силы взаимодействия магнитов оказались равными и противоположно направленными:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}. \quad (1)$$

Данное равенство представляет собой математическую формулировку **третьего закона Ньютона**: силы, с которыми тела действуют друг на друга, равны по модулю и направлены вдоль одной прямой в противоположные стороны.

Используя второй закон Ньютона, равенство (1) можно переписать в виде

$$m_1 \vec{a}_1 = -m_2 \vec{a}_2, \quad (2)$$

где m_1 и m_2 — массы взаимодействующих тел; $\vec{a}_1$ и $\vec{a}_2$ — ускорения, сообщённые телам.

Из формулы (2) непосредственно следует, что

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1} = \text{const},$$

т. е. отношение модулей a_1 и a_2 ускорений взаимодействующих тел равно обратному отношению их масс и не зависит от природы сил, действующих между ними.

Из последнего равенства следует, что в результате взаимодействия более массивное тело получает меньшее ускорение, чем более лёгкое тело. Например, при ударе футболиста ногой по мячу наблюдается заметное изменение скорости мяча, а вот обратное воздействие мяча на футболиста не приводит к сколько-нибудь существенному изменению характера его движения.



Третий закон Ньютона имеет следующую формулировку:

силы, с которыми тела действуют друг на друга, равны по модулю и направлены вдоль одной прямой в противоположные стороны:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}.$$

Необходимо помнить, что силы, о которых идёт речь в третьем законе Ньютона, приложены к разным телам и поэтому не могут уравновешивать друг друга. Говорить о равнодействующей этих сил не имеет смысла.

ВОПРОСЫ:

- Имеется ли физическое различие между действием и противодействием?
- Могут ли компенсировать друг друга силы, возникающие при взаимодействии двух тел?
- Как формулируется третий закон Ньютона?
- Почему при столкновении легковой машины с грузовиком повреждений у легковой машины больше, чем у грузовика?

ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое сила всемирного тяготения.
- Как формулируется закон всемирного тяготения.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое гелиоцентрическая система мира?
- Что такое ускорение свободного падения?
- Какое ускорение сообщается телу при его движении по окружности?



Входящую в закон всемирного тяготения массу мы вправе назвать **гравитационной** или весомой массой, тогда как масса, которая входит во второй закон Ньютона, определяет инертные свойства тела и поэтому называется **инертной** массой. Из механики Ньютона вовсе не следует, что эти массы должны быть равными. Однако в современных опытах эквивалентность инертной и гравитационной масс доказана с точностью порядка 10^{-12} !

Подброшенный вверх мяч всё равно упадёт на поверхность Земли. Каждый из нас объясняет это тем, что на мяч, как и на все другие тела, со стороны Земли действует сила притяжения. Согласно третьему закону Ньютона и мяч притягивает Землю с такой же по модулю силой, т.е. между Землёй и мячом действуют силы взаимного притяжения.

СИЛА ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ Настоящую революцию в человеческом мышлении совершил польский астроном Н. Коперник, показав, что все планеты вращаются вокруг Солнца. Предложенная Коперником гелиоцентрическая модель мира вдохновила учёных на поиски закономерностей, которым подчиняется движение планет.

Такие закономерности были обнаружены в начале XVII в. немецким астрономом И. Кеплером, который в своих исследованиях опирался на наблюдения датского астронома Тихо Браге. Однако сам Кеплер не смог объяснить открытые им закономерности в движении планет.

Существует историческая легенда о падающем яблоке, которое якобы навело Ньютона на мысль о всемирном тяготении, в результате которого яблоко падает на поверхность Земли, Луна движется вокруг Земли, а планеты — вокруг Солнца. Открытие Ньютоном силы всемирного тяготения, действию которой подчиняются не только земные тела, но и все объекты во Вселенной, оказало колоссальное влияние на всё дальнейшее развитие науки. От каких же физических величин зависит эта сила?

ЗАВИСИМОСТЬ СИЛЫ ТЯГОТЕНИЯ ОТ МАСС ТЕЛ Г. Галилей опытным путём установил, что Земля сообщает всем телам в данном месте одинаковые ускорения независимо от их масс. Это возможно лишь тогда, когда сама сила $\vec{F}$, с которой Земля притягивает тело, прямо пропорциональна его массе. Действительно, изменение массы m тела в несколько раз приведёт в этом случае к такому же изменению модуля силы $\vec{F}$, однако ускорение, равное отношению $\vec{F}/m$, остаётся при этом неизменным.

Таким образом, сила всемирного тяготения прямо пропорциональна массе тела, на которое эта сила действует. Вместе с тем притяжение тел может быть только взаимным. Согласно третьему закону Ньютона на оба притягивающихся тела действуют одинаковые по модулю силы. Следовательно, сила взаимного притяжения должна быть пропорциональна массе каждого из тел. Только в этом случае оба тела будут получать ускорения, не зависящие от их масс.

Поскольку сила тяготения прямо пропорциональна массе каждого из взаимодействующих тел, она пропорциональна произведению масс обоих тел.

ЗАВИСИМОСТЬ СИЛЫ ТЯГОТЕНИЯ ОТ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ТЕЛАМИ

И. Ньютон предположил, что сила тяготения должна зависеть от расстояния между телами. Чтобы установить эту зависимость, он обратился к анализу закономерности движения Луны вокруг Земли. Если допустить, что это движение происходит под действием силы тяготения между ними, то Земля должна сообщать Луне центростремительное ускорение

$$a_{ц} = \frac{v^2}{R} = \left(\frac{2\pi R}{T} \right)^2 \cdot \frac{1}{R} = \frac{4\pi^2}{T^2} R, \quad (1)$$

где R — радиус лунной орбиты, равный примерно 60 радиусам Земли; $T = 27$ сут. 7 ч 43 мин — период обращения Луны вокруг Земли.

Если учесть, что радиус Земли $R_З = 6400$ км $= 6,4 \cdot 10^6$ м, то, выразив период обращения T в секундах, для центростремительного ускорения получим значение

$$a_{ц} = 0,0027 \text{ м/с}^2.$$

Это значение приблизительно в $3600 = 60^2$ раз меньше ускорения свободного падения тел вблизи поверхности Земли. Таким образом, при увеличении расстояния между притягивающимися телами в 60 раз ускорение уменьшается в 60^2 раз. Отсюда можно заключить, что ускорения, сообщаемые телам силой всемирного тяготения, а следовательно, и сама эта сила обратно пропорциональны квадрату расстояния между взаимодействующими телами.

ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ С учётом вышеизложенного математическую формулировку закона всемирного тяготения записывают в виде

$$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}, \quad (2)$$

где m_1 и m_2 — массы взаимодействующих тел, R — расстояния между ними, G — коэффициент пропорциональности, одинаковый для всех тел в природе.

Коэффициент G получил название **гравитационной постоянной**. Значение этого коэффициента может быть найдено только опытным путём. Из закона всемирного тяготения находим, что

$$G = \frac{F \cdot R^2}{m_1 m_2}.$$

Отсюда следует, что гравитационная постоянная численно равна силе притяжения двух точечных тел массой по 1 кг, расположенных на расстоянии 1 м друг от друга. Её численное значение в единицах СИ равно:

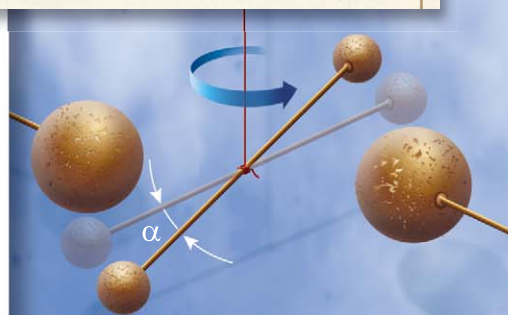
$$G = 6,674 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2.$$

Хотя закон всемирного тяготения (2) сформулирован для точечных масс, его можно использовать в случае, если размеры тел пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием между ними. Для однородных тел сферической формы этот закон является точным, при этом под R подразумевается расстояние между центрами сфер.

Закон всемирного тяготения,

сформулированный в 1667 г. И. Ньютоном, гласит: сила взаимного притяжения двух тел прямо пропорциональна произведению масс этих тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

Первые точные измерения гравитационной постоянной были проведены в 1798 г. английским учёным Г. Кавендишем. Опыты проводились при помощи так называемых крутильных весов, к концам коромысла которых были прикреплены небольшие свинцовые шары. Вблизи них закреплялись большие тяжёлые шары. В результате притяжения малых шаров к большим коромысло немного поворачивалось, и по углу закручивания упругой нити измерялась сила.



ВОПРОСЫ:

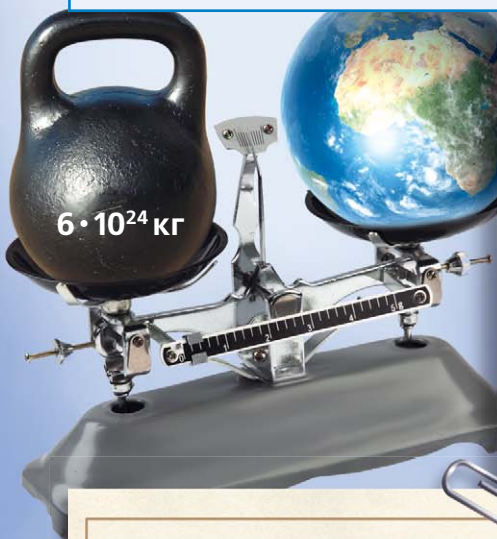
- Как формулируется закон всемирного тяготения?
- Что такое гравитационная постоянная и как она была измерена?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как ускорение свободного падения зависит от высоты над поверхностью Земли.
- Что такое сила тяжести.
- Что такое первая космическая скорость.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое ускорение свободного падения?
- Что такое закон всемирного тяготения?
- Как можно записать уравнение динамики для тела, движущегося по окружности?



«Взвешивание» Земли оказалось возможным потому, что гравитационная постоянная была измерена на основе независимого эксперимента. На самом деле не существует никаких астрономических методов, которые позволили бы определить массы Земли и других планет.

Открытие Галилеем равенства ускорений всех падающих тел сыграло важную роль в развитии теории тяготения.

ДВИЖЕНИЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ ТЯГОТЕНИЯ

Тяготение оказывает значительное влияние на движение тел как в земных условиях, так и далеко за пределами Земли. Закон всемирного тяготения лежит в основе целой отрасли науки — небесной механики, изучающей движение планет и звёзд. Этот закон позволяет с высокой точностью рассчитывать движение искусственных спутников Земли и межпланетных станций.

УСКОРЕНИЕ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ Рассмотрим свободное падение тела массой m , находящегося на высоте h над поверхностью Земли. Поскольку на тело действует только сила тяготения, уравнение второго закона Ньютона можно записать в виде

$$ma = mg_h = G \frac{mM_3}{(R_3 + h)^2}, \quad (1)$$

где g_h — ускорение свободного падения на высоте h ; M_3 и R_3 — масса и радиус Земли. Из формулы (1) получим

$$g_h = G \frac{M_3}{(R_3 + h)^2}. \quad (2)$$

Таким образом, *ускорение свободного падения не зависит от массы тела, но существенно зависит от его положения над поверхностью Земли.* Как следует из равенства (2), ускорение свободного падения обратно пропорционально квадрату расстояния тела от центра Земли. На поверхности Земли ($h = 0$) формулу (2) для ускорения можно записать в виде

$$g = G \frac{M_3}{R_3^2}. \quad (3)$$

Поскольку ускорение свободного падения можно определить опытным путём, из формулы (3) можно вычислить массу Земли:

$$M_3 = \frac{gR_3^2}{G}. \quad (4)$$

Подставив в формулу (4) известные численные значения $g \approx 9,8 \text{ м/с}^2$, $R = 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}$ и $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$, получим $M_3 \approx 6,0 \cdot 10^{24} \text{ кг}$.

СИЛА ТЯЖЕСТИ Очень важным видом всемирного тяготения является сила притяжения тел к Земле. Эту силу называют **силой тяжести**. Согласно закону всемирного тяготения силу тяжести выражают в виде формулы

$$F_{\text{тяж}} = G \frac{mM_3}{(R_3 + h)^2} = mg. \quad (5)$$

Как видно из формулы (5), *сила тяжести, действующая на тело, зависит от положения тела относительно поверхности Земли.* Если высота h над поверх-

ностью Земли не превышает 100 км, то изменением силы тяжести с высотой можно пренебречь, считая её равной значению силы тяжести на поверхности Земли.

Поскольку сила тяжести прямо пропорциональна ускорению свободного падения, то её значение, так же как и ускорение свободного падения, зависит от географической широты места на земном шаре. Прежде всего это связано с вращением Земли вокруг своей оси. Формула (3) для ускорения свободного падения, полученная на основе второго закона Ньютона, справедлива только в инерциальной системе отсчёта. Система отсчёта, связанная с Землёй, в отличие от гелиоцентрической, не является инерциальной. Однако в подавляющем большинстве случаев эффектами, связанными с неинерциальностью геоцентрической системы отсчёта, обычно пренебрегают.

ДВИЖЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ. ПЕРВАЯ КОСМИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ

Примером движения под действием силы тяжести является движение искусственных спутников Земли. Для того чтобы тело вышло за пределы земной атмосферы, у него должна быть достаточно большая начальная скорость, поскольку, чем больше эта скорость, тем на большую высоту поднимется тело. *При некоторой начальной скорости тело выйдет за пределы земной атмосферы и станет искусственным спутником.*

Найдём эту скорость, записав уравнение движения спутника по круговой орбите на высоте h над поверхностью Земли:

$$ma_{\text{ц}} = F_{\text{тяж}}, \quad (6)$$

где m — масса спутника; $a_{\text{ц}}$ — центростремительное ускорение, которое рассчитывают по формуле

$$a_{\text{ц}} = \frac{v^2}{R_3 + h}. \quad (7)$$

Подставив формулы (5) и (7) в уравнение (6), получим

$$m \frac{v^2}{R_3 + h} = G \frac{mM_3}{(R_3 + h)^2}, \quad \text{откуда } v = \sqrt{G \frac{M_3}{R_3 + h}}. \quad (8)$$

Формула (8) позволяет рассчитать скорость v , которую нужно сообщить телу, поднятому на высоту h над Землёй, чтобы оно стало искусственным спутником Земли.

Минимальную скорость, которую необходимо сообщить телу у поверхности Земли, чтобы оно стало искусственным спутником, называют **первой космической скоростью**. Её значение можно получить непосредственно из формулы (8), полагая, что $h = 0$:

$$v_1 = \sqrt{G \frac{M_3}{R_3}}. \quad (9)$$

С учётом формулы (4) для массы Земли для первой космической скорости получим простую формулу

$$v_1 = \sqrt{gR_3} = \sqrt{9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}} \approx 7,9 \frac{\text{км}}{\text{с}}.$$

Другой, не такой существенной причиной зависимости ускорения свободного падения от географической широты является то, что земной шар несколько сплюснут у полюсов. Экваториальный радиус Земли больше полярного на 21 км. Влияние вращения Земли и её сплюснутость у полюсов приводят к тому, что ускорение свободного падения меняется от значения $g_{\text{п}} \approx 9,83 \text{ м/с}^2$ на полюсах до значения $g_{\text{э}} \approx 9,78 \text{ м/с}^2$ на экваторе, причём на широте 45° $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Если скорость тела меньше первой космической скорости, то оно всё равно упадёт на Землю. Если же скорость тела превышает значение **11,2 км/с**, которое называют **второй космической скоростью**, то оно преодолит притяжение Земли и станет спутником Солнца.

ВОПРОСЫ:

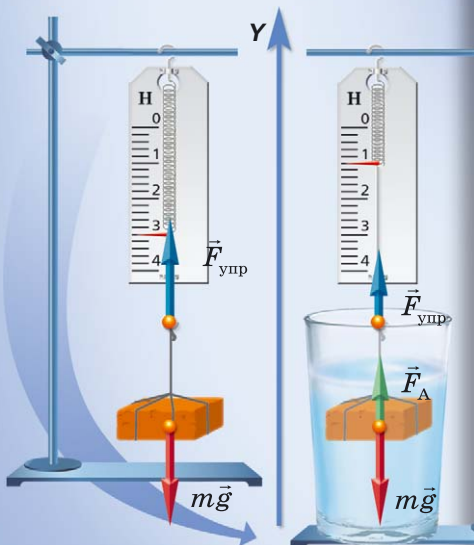
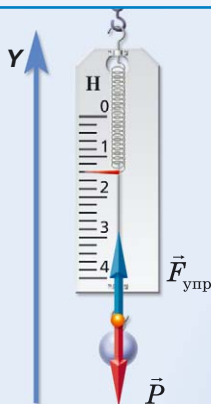
- Как ускорение свободного падения зависит от географической широты местности?
- Влияет ли вращение Земли вокруг своей оси на силу тяжести?
- От каких величин зависит первая космическая скорость?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое вес тела.
- Как вес тела зависит от ускорения опоры или подвеса.
- Что такое невесомость.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое сила тяжести?
- Как можно записать уравнение второго закона Ньютона, если на тело действует несколько сил?



С понятием «вес» вы познакомились в начальном курсе физики. Теперь нам предстоит это понятие расширить и установить, какое влияние на вес оказывает движение тела с ускорением.

ВЕС ТЕЛА И СИЛА ТЯЖЕСТИ Рассмотрим тело, подвешенное к пружине, верхний конец которой закреплён в лапке штатива. При этом на тело действуют сила тяжести и сила упругости пружины. Поскольку тело находится в равновесии, то эти силы уравновешивают друг друга.

Таким образом, если тело и подвес неподвижны или движутся равномерно и прямолинейно, т.е. без ускорения, то согласно второму закону Ньютона

$$\vec{F}_{\text{тяж}} + \vec{F}_{\text{упр}} = 0. \quad (1)$$

Если пружина действует на тело с силой упругости $\vec{F}_{\text{упр}}$, то согласно третьему закону Ньютона тело действует на крючок пружины с некоторой силой $\vec{P}$, причём $\vec{P} = -\vec{F}_{\text{упр}}$. Здесь $\vec{P}$ и есть вес тела.

Следовательно, силу, с которой тело в результате его притяжения Землёй растягивает подвес или действует на опору, называют **весом тела**.

Из последних двух равенств следует, что

$$\vec{P} = \vec{F}_{\text{тяж}} = m\vec{g},$$

т.е. если опора или подвес покоятся или движутся без ускорения, то вес тела равен силе тяжести.

Однако вес нельзя отождествлять с силой тяжести: это разные физические понятия. Сила тяжести и вес тела имеют *различную физическую природу*: сила тяжести возникает вследствие взаимодействия тела и Земли, а вес — в результате взаимодействия тела и опоры (подвеса). Именно поэтому **сила тяжести приложена к телу, а вес — к опоре или подвесу**. Следовательно, вес тела представляет собой частный случай проявления сил упругости.

Необходимо также помнить, что вес определяется совокупностью всех действующих на тело сил, а не только силой тяжести. В этом легко убедиться на опыте, взвешивая, например, тело в жидкости.

Если тело, подвешенное к крючку динамометра, опустить в воду, то показания динамометра уменьшатся, поскольку на тело начнёт действовать и выталкивающая (архимедова) сила. Поэтому условие равновесия тела можно записать в виде

$$\vec{F}_{\text{тяж}} + \vec{F}_A + \vec{F}_{\text{упр}} = 0, \quad (2)$$

или в проекции на вертикальное направление

$$-mg + F_A + F_{\text{упр}} = 0.$$

Поскольку на крючок динамометра действуют сила упругости и вес тела, причём $\vec{P} = -\vec{F}_{\text{упр}}$, то из условия

равновесия получим $P = mg - F_A$. Таким образом, вес тела в воде оказывается меньше веса в воздухе.

ЗАВИСИМОСТЬ ВЕСА ТЕЛА ОТ УСКОРЕНИЯ ОПОРЫ (ПОДВЕСА)

Рассмотрим теперь случай, когда динамометр с прикрепленным к нему телом движется относительно Земли в вертикальном направлении с некоторым ускорением. Согласно второму закону Ньютона уравнение движения тела можно записать в виде

$$m\vec{g} + \vec{F}_{\text{упр}} = m\vec{a}. \quad (3)$$

Если тело движется *вниз*, то в проекции на ось OY , также направленную вниз, уравнение (3) примет вид

$$mg - F_{\text{упр}} = ma,$$

откуда $F_{\text{упр}} = mg - ma$. Поскольку вес P тела по модулю равен силе $F_{\text{упр}}$, то

$$P = mg - ma. \quad (4)$$

Из равенства (4) видно, что при движении вниз в случае, если $a < g$, вес тела меньше силы тяжести mg , т. е. меньше веса покоящегося тела.

Если динамометр с подвешенным к нему телом поднимать с ускорением *вверх*, то уравнение движения (3) принимает вид

$$mg - F_{\text{упр}} = -ma,$$

откуда $F_{\text{упр}} = mg + ma$, следовательно,

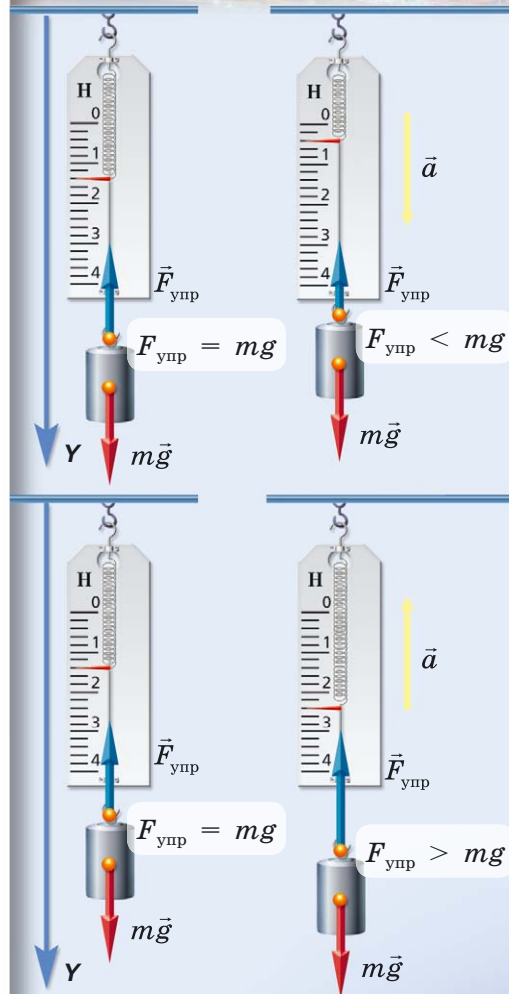
$$P = mg + ma. \quad (5)$$

Таким образом, при движении вверх, когда ускорение тела направлено противоположно ускорению свободного падения, его вес больше веса покоящегося тела.

НЕВЕСОМОСТЬ И ПЕРЕГРУЗКА Из формулы (4) непосредственно следует, что при свободном падении динамометра с прикрепленным к нему телом, т. е. в случае $a = g$, вес тела $P = mg - mg = 0$, т. е. наступает состояние **невесомости**. Тело не давит на опору и не растягивает подвес. Земля по-прежнему притягивает и тело, и подвес, сообщая им одинаковые ускорения свободного падения. Поэтому тело не давит на подвес и не растягивает пружину. Увеличение веса тела при ускоренном движении вверх подвеса (или опоры) называют **перегрузкой**. С учётом формулы (5) перегрузку определяют отношением веса ускоренно движущегося тела к весу покоящегося тела:

$$k = \frac{m(g+a)}{mg} = 1 + \frac{a}{g}.$$

Лётчики-испытатели и космонавты способны кратковременно выдерживать почти семикратную перегрузку.



Любое тело находится в состоянии невесомости, если на него действует только сила тяжести. Например, все тела, находящиеся в космическом корабле, свободно обращающемся вокруг Земли, невесомы.

ВОПРОСЫ:

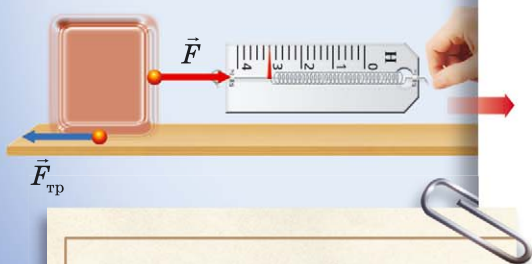
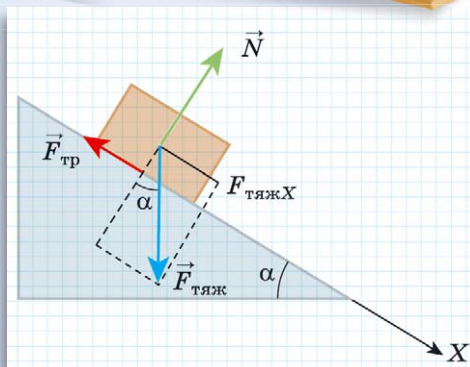
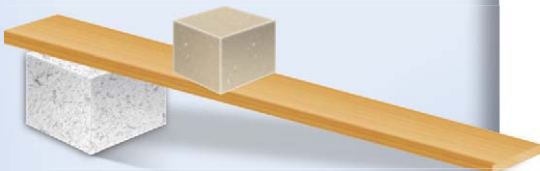
- Что называют весом тела?
- Чему равен вес тела, движущегося с известным ускорением вниз? вверх?
- Чем отличается вес тела от силы тяжести?
- Что такое невесомость?
- Что такое перегрузка?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Какова природа сил трения.
- В чём заключается различие сил трения и сил упругости.
- Что такое трение покоя и трение скольжения.
- Что такое коэффициент трения.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое сила упругости?
- Как движется тело, если проекции сил на направление движения равны по величине и противоположны по знаку?



При скольжении дерева по дереву без смазки с некоторой скоростью сила трения также пропорциональна нормальному давлению.

Ш. Кулон

Изучая законы механики, вы уже познакомились с двумя типами сил: с силами упругости и силами тяготения. Однако существует ещё один тип сил, без действия которых невозможно представить себе движение любого тела. Это силы трения, которые всегда препятствуют относительному перемещению тел.

ПРИРОДА СИЛ ТРЕНИЯ Одна из отличительных особенностей сил трения заключается в том, что эти силы всегда направлены вдоль поверхностей соприкосновения тел, в то время как силы упругости направлены перпендикулярно этим поверхностям. Вместе с тем физическая природа сил трения и сил упругости одинакова и обусловлена электрическим взаимодействием молекул.

Обсудим причину того, что тело, лежащее на наклонной плоскости, не соскальзывает вниз. Нетрудно понять, что эта причина обусловлена наличием многочисленных неровностей на соприкасающихся поверхностях тел. Эти неровности цепляются друг за друга и препятствуют соскальзыванию тела.

То же самое происходит в случае, если одно тело пытаются перемещать по поверхности другого под действием внешней силы.

Однако при возникновении проскальзывания тел относительно друг друга шероховатости и неровности начинают разрушаться, что является следствием разрыва молекулярных связей.

Эта особенность характерна только для сил трения, и в этом заключается одно из главных различий между силами трения и силами упругости.

ТРЕНИЕ ПОКОЯ Анализируя условия равновесия тела, находящегося на наклонной поверхности, мы приходим к выводу, что на тело в направлении, параллельном наклонной плоскости, должна действовать сила, которая компенсирует проекцию силы тяжести на это направление. Эта сила получила название **силы трения покоя**.

Возникновение и изменение силы трения покоя легко проследить на опыте, используя брусок, помещённый на горизонтальную подставку, и динамометр.

Поддействуем на брусок посредством пружины динамометра некоторой горизонтальной силой $\vec{F}$. Опыт показывает, что, пока эта сила меньше некоторого значения $\vec{F}_{\max}$, брусок сохраняет состояние покоя. Это означает, что одновременно с внешней силой $\vec{F}$ на брусок со стороны поверхности начинает действовать сила трения $\vec{F}_{\text{тр}}$, равная по модулю внешней силе и направленная противоположно.

Как показывают опыты, **сила трения покоя равна по модулю и направлена противоположно силе, приложенной к телу параллельно поверхности соприкосновения его с другим телом.**

Если тело лежит на горизонтальной поверхности и параллельно этой поверхности на тело не действуют никакие силы, то *сила трения покоя равна нулю*.

Таким образом, сила трения покоя может изменяться от нуля до некоторого максимального значения $\vec{F}_{\text{тр. max}}$. Только в том случае, если параллельная поверхности сила $\vec{F}$ превысит это значение, тело начнёт перемещаться.

Опытным путём можно установить, от чего зависит максимальное значение силы трения покоя. Для этого будем помещать на брусок дополнительные грузы, увеличивая тем самым силу, прижимающую брусок к поверхности.

Опыт показывает, что максимальная сила трения покоя прямо пропорциональна этой силе. Поскольку сила, прижимающая брусок к поверхности, уравнивается силой $\vec{N}$ реакции опоры, то можно записать:

$$F_{\text{тр. max}} = \mu N,$$

где коэффициент пропорциональности μ не зависит от прижимающей силы. Он называется **коэффициентом трения покоя**. Этот коэффициент зависит от материалов, из которых изготовлены поверхности соприкасающихся тел, а также от качества обработки поверхностей и их состояния.

ТРЕНИЕ СКОЛЬЖЕНИЯ Когда действующая на брусок со стороны динамометра сила упругости $\vec{F}_{\text{упр}}$ незначительно превысит силу трения покоя $\vec{F}_{\text{тр. max}}$, то брусок начнёт скользить по поверхности. Если брусок движется равномерно, то это означает, что на него в горизонтальном направлении действует ещё одна сила, равная по модулю силе упругости, но направленная противоположно ей. Эту силу называют **силой трения скольжения**.

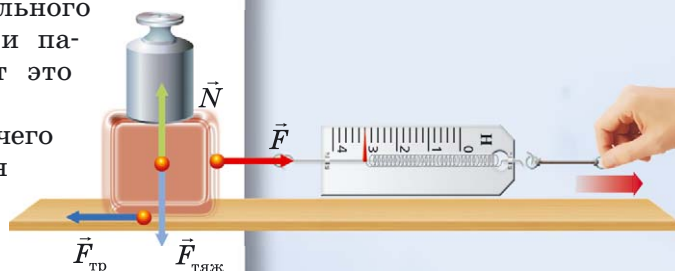
Важная особенность силы трения скольжения заключается в том, что она направлена всегда противоположно направлению скорости движения одного тела относительно соприкасающегося с ним другого тела.

Так же как и максимальная сила трения покоя, сила трения скольжения пропорциональна силе нормального давления, модуль которой равен модулю силы реакции опоры $\vec{N}$.

При малых относительных скоростях движения тел сила трения скольжения весьма незначительно отличается от максимальной силы трения покоя. Поэтому в большинстве случаев силу трения скольжения считают постоянной и равной значению $\vec{F}_{\text{тр. max}}$:

$$F_{\text{тр}} = F_{\text{тр. max}} = \mu N.$$

Как показывают опыты, сила трения не зависит от площади соприкасающихся поверхностей тел, а зависит от их относительной скорости.



МОИ ФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Определите опытным путём коэффициент трения головки спички о спичечный коробок.

«ПОМОЩНИК»

С помощью нити и скотча соедините спички так, чтобы по коробку могли двигаться только их головки.

В качестве дополнительного оборудования используйте динамометр и набор разновесов.

Если обозначить величины: сила трения — $F_{\text{тр}}$, коэффициент трения — μ , сила реакции опоры — N , то силу трения скольжения рассчитывают по формуле

$$F_{\text{тр}} = \mu N.$$

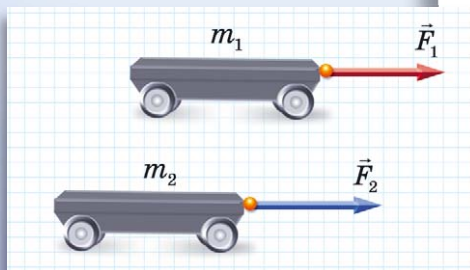
ВОПРОСЫ:

- Какую силу называют силой трения?
- В чём заключается сходство, а в чём различия сил трения и сил упругости?
- От каких факторов зависит сила трения скольжения?

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как решать задачи на второй и третий законы Ньютона.
- Как решать задачи на вычисление зависимости веса от состояния движения тела.
- Как решать задачи на движение тела с учётом силы трения.



ЗАДАЧА 1 На тележку массой $m_1 = 0,3$ кг действуют силой $F_1 = 0,9$ Н. Чему равна масса m_2 другой тележки, которая под действием силы $F_2 = 1,2$ Н движется с таким же ускорением, как и первая тележка?

Дано:
 $m_1 = 0,3$ кг
 $F_1 = 0,9$ Н
 $F_2 = 1,2$ Н

m_2 — ?

Решение:

Используя второй закон Ньютона, находим ускорение, с которым движется первая тележка:

$$a_1 = \frac{F_1}{m_1}.$$

Аналогично для второй тележки $a_2 = \frac{F_2}{m_2}$.

Поскольку $a_1 = a_2$, получим $m_2 = m_1 \frac{F_2}{F_1}$.

Подставив числовые значения, найдём:

$$m_2 = 0,3 \frac{1,2}{0,9} \text{ кг} = 0,4 \text{ кг}.$$

Ответ: $m_2 = 0,4$ кг.

ЗАДАЧА 2 Два одинаковых бруска, связанные нерастяжимой невесомой нитью, находятся на гладкой горизонтальной плоскости. К брускам приложены силы $F_1 = 3$ Н и $F_2 = 2$ Н, составляющие с горизонтом углы $\alpha = 30^\circ$ и $\beta = 45^\circ$. Найдите ускорение системы и силу натяжения нити, если масса каждого из брусков $m = 1$ кг.

Дано:
 $m = 1$ кг
 $F_1 = 3$ Н
 $F_2 = 2$ Н
 $\alpha = 30^\circ$
 $\beta = 45^\circ$

a — ?

T — ?

Решение:

Ускорение каждого из тел определяется проекцией равнодействующей силы на направление движения. Запишем второй закон Ньютона в проекции на ось OX для каждого бруска:

$$ma_1 = F_1 \cos \alpha - T_1, \quad (1)$$

$$ma_2 = -F_2 \cos \beta + T_2. \quad (2)$$

Поскольку нить нерастяжима, то $a_1 = a_2 = a$.

Согласно третьему закону Ньютона $T_1 = T_2 = T$.

Сложив почленно левые и правые части уравнений, получим $2ma = F_1 \cos \alpha - F_2 \cos \beta$.

Следовательно, $a = \frac{F_1 \cos \alpha - F_2 \cos \beta}{2m}$.

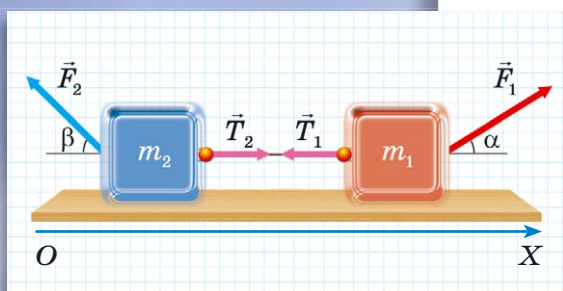
Из любого из равенств (1) или (2) находим:

$$T = \frac{F_1 \cos \alpha + F_2 \cos \beta}{2}.$$

Подставив числовые значения, получим

$$a \approx 0,6 \text{ м/с}^2; T \approx 2,0 \text{ Н}.$$

Ответ: $a \approx 0,6 \text{ м/с}^2; T \approx 2,0 \text{ Н}.$



ЗАДАЧА 3 Вес некоторого тела на полюсе Земли на 0,17 Н больше, чем его вес на экваторе. Найдите массу этого тела. Период обращения Земли вокруг своей оси 24 ч, радиус Земли 6400 км.

Дано:
 $\Delta P = 0,17 \text{ Н}$
 $T = 24 \text{ ч}$
 $R = 6400 \text{ км}$

 $m = ?$

СИ
 $86,4 \cdot 10^3 \text{ с}$
 $6,4 \cdot 10^6 \text{ м}$

Решение:
 Согласно третьему закону Ньютона вес тела равен силе реакции опоры. Различия в весе обусловлены тем, что на полюсе тело покоится, а на экваторе — движется по

окружности вследствие вращения Земли вокруг своей оси. Запишем уравнения второго закона Ньютона для двух положений тела:

$$F_{\text{тяж1}} - N_1 = 0, \quad (1)$$

$$F_{\text{тяж2}} - N_2 = ma_{\text{ц.с}}, \quad (2)$$

где $a_{\text{ц.с}} = \omega^2 R$ — центростремительное ускорение, которое испытывает тело на экваторе; ω — угловая скорость вращения Земли. Из уравнений (1) и (2) находим:

$$\Delta P = N_1 - N_2 = m\omega^2 R.$$

Следовательно,

$$m = \frac{\Delta P}{\omega^2 R} = \frac{\Delta P T^2}{4\pi^2 R}.$$

Подставив числовые значения, получим

$$m = \frac{0,17 \cdot (86,4 \cdot 10^3)^2}{4 \cdot (3,14)^2 \cdot 6,4 \cdot 10^6} \text{ кг} \approx 5 \text{ кг}.$$

Ответ: $m \approx 5 \text{ кг}$.

ЗАДАЧА 4 С каким наибольшим ускорением должен разгоняться грузовик, чтобы лежащий в его кузове кирпич не начал смещаться к заднему борту? Коэффициент трения кирпича о дно кузова равен 0,4.

Дано:
 $\mu = 0,4$

$a_{\text{max}} = ?$

Решение:

Пусть ускорение автомобиля достигло такого значения, что кирпич находится на грани проскальзывания. Это означает, что сила трения покоя, действующая на кирпич, достигла своего максимального значения: $F_{\text{тр}} = \mu N$.

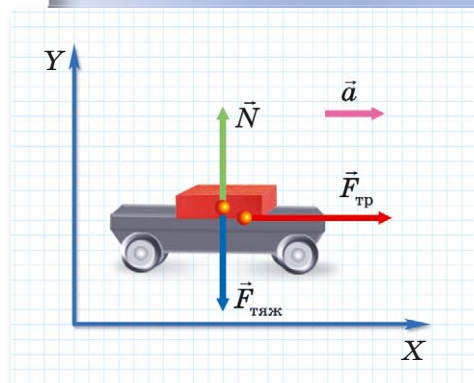
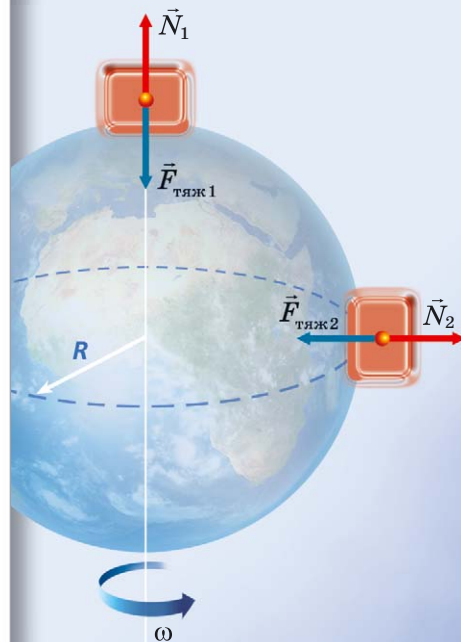
Так как в вертикальном направлении кирпич уравновешен, то $N - mg = 0$.

Ускорение телу сообщает именно сила трения покоя, направление которой совпадает с направлением движения грузовика: $F_{\text{тр}} = ma$.

Из этих равенств находим:

$$a_{\text{max}} = \mu g = 4 \text{ м/с}^2.$$

Ответ: $a_{\text{max}} = 4 \text{ м/с}^2$.



Тяготения

$$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$$

Трения

$$F_{\text{тр}} = \mu N$$

Вес

$$\vec{P} = m\vec{g}$$

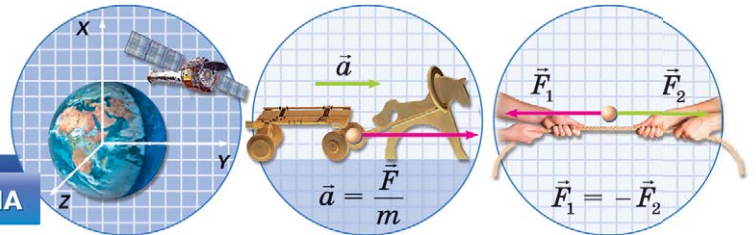
СИЛА

Модуль
Направление
Точка приложения

ЗАКОНЫ НЬЮТОНА

ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

- Первый закон Ньютона: существуют такие системы отсчёта, называемые инерциальными, в которых тело, не взаимодействующее с другими телами, сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения.
- Второй закон Ньютона: ускорение тела прямо пропорционально действующей силе, приложенной к телу, и обратно пропорционально его массе.
- Третий закон Ньютона: силы, с которыми тела действуют друг на друга, равны по модулю и направлены вдоль одной прямой в противоположные стороны.
- Закон всемирного тяготения: сила взаимного притяжения двух тел прямо пропорциональна произведению масс этих тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.
- Силу, с которой тело вследствие его притяжения Землёй растягивает подвес или действует на опору, называют весом тела.
- Силу, возникающую между поверхностями соприкасающихся тел и препятствующую их относительному перемещению, называют силой трения.



ПОДРОБНЕЕ...

Белонучкин В.Е. Кеплер, Ньютон и все-все-все... Вып. 78. / В.Е. Белонучкин. — М.: Наука, 1990. — (Библиотечка «Квант»).

Перельман Я.И. Занимательная физика. Кн. 2. / Я.И. Перельман. — М.: Римис, 2010.

Энциклопедия для детей. Т. 14. Техника. — М.: Аванта+, 2000.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

- Как известно, силы, с которыми тела действуют друг на друга, равны по модулю и направлены противоположно. Можно ли утверждать, что равнодействующая этих сил равна нулю?
- Если на гладкий столик в вагоне поезда положить мячик, то при трогании вагона с места мячик начнёт двигаться относительно стола в сторону, противоположную направлению движения поезда. Не противоречит ли это закону инерции?
- Не закрытая пробкой пластиковая бутылка с водой падает вниз горлышком. Будет ли при этом из бутылки вытекать вода?
- Из какой доски легче вытаскивать забитый гвоздь — из сырой или из сухой?

Элементы: Популярный сайт
о фундаментальной науке
<http://gotourl.ru/13728>

Портал журнала
«Наука и жизнь»
<http://gotourl.ru/13729>





Глава 3

СТАТИКА

- УСЛОВИЯ РАВНОВЕСИЯ НЕВРАЩАЮЩЕГОСЯ ТЕЛА
- РАВНОВЕСИЕ ТЕЛ С ЗАКРЕПЛЁННОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ. УСТОЙЧИВОСТЬ РАВНОВЕСИЯ
- РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

РАЗДЕЛ I



МЕХАНИКА

КОРОТКО О ГЛАВНОМ...

Соизмеримые величины уравниваются, если длины, на которых они подвешены, находятся в обратном отношении к тяжестям.

Архимед

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое абсолютно твёрдое тело.
- Как формулируются условия равновесия невращающегося тела.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое материальная точка?
- Что такое поступательное движение?
- Как формулируется второй закон Ньютона?

УСЛОВИЯ РАВНОВЕСИЯ НЕВРАЩАЮЩЕГОСЯ ТЕЛА

На практике часто важно знать, при каких условиях тела, на которые действуют те или иные силы, не испытывают ускорений. Подобные состояния тел называют состояниями равновесия, одним из которых, в частности, является состояние покоя. Условия равновесия тел необходимо учитывать при постройке различных инженерных сооружений: зданий, мостов, опор, при конструировании и изготовлении машин и механизмов. Раздел механики, в котором изучают условия равновесия тел, называют *стати́кой*. В основе статики лежат законы механики Ньютона.

ПОНЯТИЕ АБСОЛЮТНО ТВЁРДОГО ТЕЛА Выяснение условий равновесия реальных тел является довольно сложной задачей, поскольку все реальные тела под действием приложенных к ним сил изменяют свои размеры и форму, т.е. деформируются.

Деформации оказывают существенное влияние на равновесие тел прежде всего потому, что в результате деформаций происходит смещение точек приложения сил, действующих на тело. Деформации могут быть как значительными, например растяжение пружины, так и малыми, которые без специальных средств наблюдения обнаружить невозможно.

Во многих случаях малыми деформациями можно пренебречь и рассматривать тело как недеформируемое. Такое тело называют **абсолютно твёрдым**. Его форма и размеры остаются неизменными при любых внешних воздействиях. В действительности недеформируемых тел не существует, поэтому абсолютно твёрдое тело — это физическая модель. Таким образом, в тех случаях, когда деформации малы, при описании равновесия реальных тел можно использовать модель абсолютно твёрдого или просто твёрдого тела.

ЦЕНТР МАСС ТЕЛА Рассмотренные ранее законы Ньютона сформулированы для тел, не имеющих размеров, т.е. для материальных точек. Для поступательно движущихся тел такое упрощение является вполне оправданным, поскольку в этом случае движение произвольной точки тела идентично движению тела в целом.

Выясним теперь, как должна быть приложена к телу сила, чтобы оно двигалось поступательно. Для этого удобно использовать обычную линейку или брусок прямоугольной формы.

Прикрепим в центре торца (точка А) бруска (рис. а) нить и будем тянуть за эту нить брусок вдоль его осевой линии. При этом брусок будет двигаться так, что скорости и перемещения любых его точек оказываются одинаковыми. Это означает, что тело движется поступательно.

Понятие твёрдого тела утвердилось в механике достаточно давно. Однако с тех пор смысл этого понятия углублялся и расширялся, что привело к появлению целого направления в физике — физики твёрдого тела. Строение кристаллов и аморфных тел, создание новых композитных материалов и высокотемпературная сверхпроводимость, разработка транзисторов нового поколения и лазеров на твёрдом теле и т.п. — вот далеко не полный перечень предметов физики твёрдого тела.

Проведём аналогичный опыт, но нить прикрепим в центре боковой грани (точка B) бруска (рис. $б$). Если теперь тянуть за нить перпендикулярно осевой линии бруска, то он также будет перемещаться поступательно.

Обе прямые, вдоль которых были направлены силы натяжения нити, пересекаются в центре (точка O) верхней грани бруска. Эта точка замечательна тем, что в ней пересекаются направления действия сил, вызывающих только поступательное перемещение тела.

Такая точка существует для каждого тела, и она получила название **центра масс** (рис. $в$).

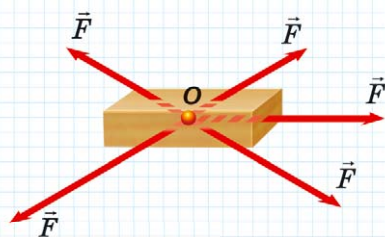
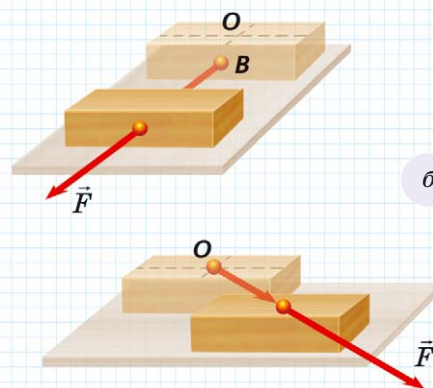
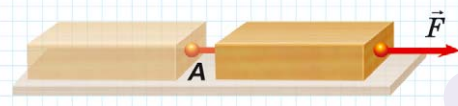
Таким образом, **центром масс тела называют точку пересечения прямых, вдоль которых должны быть направлены силы, чтобы тело двигалось поступательно.**

РАВНОВЕСИЕ НЕВРАЩАЮЩИХСЯ ТЕЛ Если тело движется поступательно, то при описании его движения можно рассматривать движение только центра масс тела. При этом учитывается, что в центре масс сосредоточена вся масса тела и если на тело действует несколько сил, то их равнодействующая приложена в центре масс.

Согласно второму закону Ньютона ускорение материальной точки (центра масс тела) равно нулю, если геометрическая сумма всех действующих на точку сил равна нулю.

Аналогично формулируется условие равновесия невращающегося тела: **невращающееся тело находится в равновесии, если равнодействующая сил, действующих на тело, равна нулю.**

При решении физических задач на равновесие твёрдых тел интересуются, как правило, их равновесием относительно определённой оси. Поэтому можно сформулировать эквивалентное условие равновесия тела: **невращающееся тело находится в равновесии, если сумма проекций приложенных к нему сил на произвольную ось равна нулю.** Находящееся в равновесии тело или покоится, или движется равномерно и прямолинейно. Такое движение характерно, например, для парашютиста, опускающегося с постоянной скоростью с большой высоты.



ВОПРОСЫ:

- Какое тело называют абсолютно твёрдым?
- Что такое центр масс тела?
- В чём заключается условие равновесия тела, движущегося поступательно?
- Обязательно ли тело, находящееся в равновесии, покоится?
- Известно, что геометрическая сумма сил, приложенных к телу, равна нулю. Чему равна при этом алгебраическая сумма проекций этих сил на некоторое направление?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое плечо силы.
- Что такое момент силы.
- Как можно записать условие равновесия тела с закреплённой осью вращения.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое равновесие тела?
- Как можно найти равнодействующую сил?

РАВНОВЕСИЕ ТЕЛ С ЗАКРЕПЛЁННОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ. УСТОЙЧИВОСТЬ РАВНОВЕСИЯ

Нетрудно показать, что сформулированные в предыдущем параграфе условия равновесия тела не являются достаточными. Действительно, если геометрическая сумма сил, действующих на тело, равна нулю, то его центр масс будет сохранять состояние покоя. Вместе с тем если к телу, например к концам лежащей на столе линейки, приложить равные, но противоположные силы $\vec{F}$ и $-\vec{F}$, то линейка начнёт вращаться вокруг оси, проходящей через её центр масс (точка O). При этом равнодействующая сил, действующих на линейку, равна нулю: $\vec{F} + (-\vec{F}) = 0$.

ПЛЕЧО СИЛЫ

Рассмотрим тело, на которое действуют силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, причём тело не может перемещаться поступательно. Например, это может быть фигура, вырезанная из плотного картона, прикреплённая булавкой к поверхности стола в точке O .

Как видно из рисунка, сила $\vec{F}_1$ оказывает вращающее воздействие на тело по часовой стрелке, тогда как сила $\vec{F}_2$ оказывает вращающее воздействие против часовой стрелки. Если модули этих сил неодинаковы, но их вращающее воздействие на тело взаимно скомпенсировано, то можно поставить вопрос: какая же физическая характеристика сил ответственна за их вращающее воздействие?

На этот вопрос ответ даёт опыт, который показывает, что для обеспечения равновесия тела для каждой из сил должно быть одинаково произведение модуля силы на расстояние от оси вращения до линии действия силы. Это расстояние, равное длине перпендикуляра, опущенного из центра вращения на направление действия силы, называют **плечом силы**.

Таким образом, отрезок d_1 — плечо силы $\vec{F}_1$, а отрезок d_2 — плечо силы $\vec{F}_2$. Используя понятие плеча силы, её вращающее воздействие можно охарактеризовать как произведение модуля силы на её плечо.

Величина, равная произведению модуля силы $\vec{F}$ на её плечо d , получила название **вращательного момента** или **момента силы относительно оси вращения**:

$$M = Fd. \quad (1)$$

Из определения момента силы следует, что один и тот же момент силы может быть вызван малой силой, но с большим плечом или большой силой, но с малым плечом. По этой причине тяжёлую дверь можно открыть сравнительно лёгким нажатием, если силу прикладывать как можно ближе к её краю.

Равновесие получается в результате уничтожения нескольких сил, которые борются и взаимно сводят на нет действие, производимое ими друг на друга...

Ж. Лагранж

В СИ за единицу вращательного момента принимают момент силы, равный 1 Н, линия действия которого отстоит от оси вращения на расстояние 1 м. Эта единица — *ньютон-метр* (1 Н·м).

ПРАВИЛО МОМЕНТОВ Принято моментам сил, вращающих тело по часовой стрелке, приписывать положительный знак, а вращающих против часовой стрелки — отрицательный. Тогда моменты сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ относительно оси O имеют противоположные знаки и их алгебраическая сумма равна нулю.

Таким образом, условие равновесия тела с закреплённой осью можно записать в виде

$$F_1 d_1 - F_2 d_2 = 0, \text{ или } M_1 + M_2 = 0. \quad (2)$$

Равенство (2) позволяет нам сформулировать правило моментов, которое является условием равновесия тела с закреплённой осью вращения: **при равновесии твёрдого тела, способного вращаться вокруг закреплённой оси, алгебраическая сумма моментов действующих на него сил относительно этой оси равна нулю.**

УСТОЙЧИВОСТЬ РАВНОВЕСИЯ ТЕЛА Тело будет находиться в равновесии, если векторная сумма приложенных к нему сил равна нулю и алгебраическая сумма моментов этих сил относительно оси вращения также равна нулю. Но является ли равновесие тела устойчивым и чем определяется устойчивость равновесия?

Ответы на эти вопросы можно получить, если рассмотреть равновесие шарика в двух случаях:

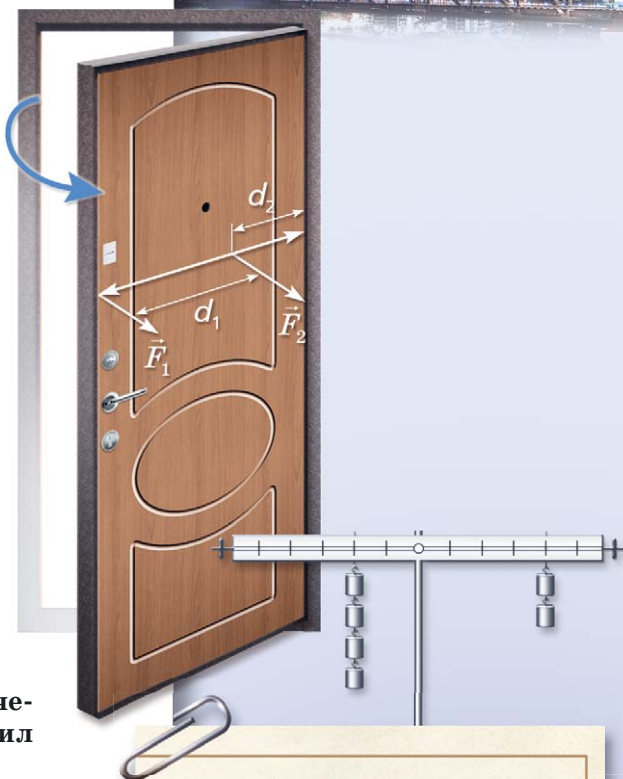
а — шарик находится на вершине выпуклой подставки;

б — шарик находится в нижней точке вогнутой подставки.

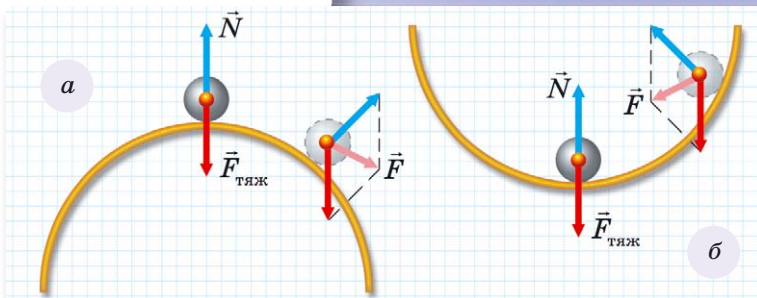
В первом случае при малейшем отклонении шарика от первоначального положения равнодействующая $\vec{F}$ сил тяжести $\vec{F}_{\text{тяж}}$ и реакции опоры $\vec{N}$ будет удалять его от положения равновесия. Следовательно, такое равновесие тела является *неустойчивым*.

В случае вогнутой поверхности при отклонении шарика от положения равновесия равнодействующая $\vec{F}$ сил тяжести $\vec{F}_{\text{тяж}}$ и реакции опоры $\vec{N}$ будет возвращать его в первоначальное положение. Равновесие шарика в этом случае является *устойчивым*.

Таким образом, устойчивость равновесия тела зависит от того, возникает или нет сила, возвращающая тело в исходное равновесное положение.



Равновесие рычага основано на равенстве моментов сил, приложенных к его плечам. Рычаг находится в равновесии, если момент силы, вращающей его по часовой стрелке, равен моменту силы, вращающей его против часовой стрелки.



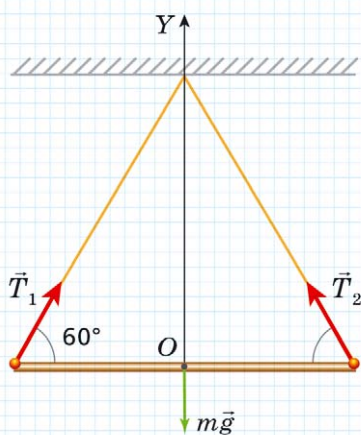
ВОПРОСЫ:

- Что такое плечо силы?
- Что такое момент силы?
- В чём заключается условие равновесия тела, которое может вращаться вокруг закреплённой оси?
- Чем определяется устойчивость равновесия тела?

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как решать задачи на равновесие тел, используя равенство проекций сил.
- Как решать задачи на равновесие тел при наличии сил трения.
- Как решать задачи на равновесие тел на основе равенства моментов сил.



ЗАДАЧА 1 Однородный стержень массой 2 кг и длиной 1 м подвешен на двух нитях длиной 1 м каждая. Нити прикреплены к концам стержня и закреплены в одной точке на потолке. Чему равна сила натяжения каждой нити?

Дано:
 $l = 1 \text{ м}$
 $m = 2 \text{ кг}$
 $T = ?$

Решение:

По условию задачи стержень и закреплённые в одной точке нити образуют равносторонний треугольник. Согласно симметрии также ясно, что сила натяжения левой и правой нитей одинаковы:

$$T_1 = T_2 = T.$$

Поскольку стержень однородный, то равнодействующая всех сил тяжести, действующих на отдельные элементы стержня, приложена в его геометрическом центре (точка O).

Запишем условие равновесия стержня в проекции на вертикальную ось OY: $2T \cos 30^\circ - mg = 0$.

Отсюда находим: $T = \frac{mg}{2 \cos 30^\circ}$,

$$T = \frac{2 \cdot 10}{\sqrt{3}} \text{ Н} \approx 11,5 \text{ Н}.$$

Ответ: $T \approx 11,5 \text{ Н}$.

ЗАДАЧА 2 Деревянный брусок, прижатый к вертикальной стенке, будет находиться в равновесии, если на него действовать горизонтальной силой, не меньшей 300 Н. Чему равна масса бруска, если коэффициент трения между бруском и стенкой 0,2?

Дано:
 $F = 300 \text{ Н}$
 $\mu = 0,2$
 $m = ?$

Решение:

Выберем прямоугольную систему координат и запишем условие равновесия бруска в проекциях на координатные оси OX и OY. При этом учтём, что в горизонтальном направлении на брусок действуют внешняя сила $\vec{F}$ и

сила реакции опоры $\vec{N}$ со стороны стенки. В вертикальном направлении на брусок также действуют две силы — сила тяжести $m\vec{g}$ и сила трения $\vec{F}_{\text{тр}}$:

$$\text{OX: } N - F = 0, \quad (1)$$

$$\text{OY: } F_{\text{тр}} - mg = 0. \quad (2)$$

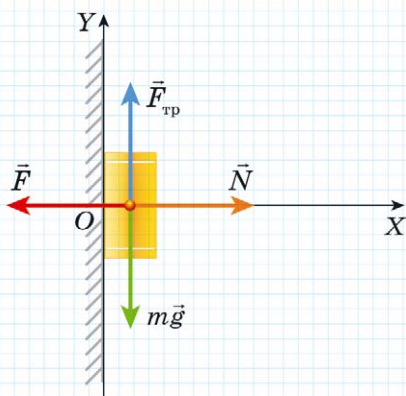
Поскольку прижатый брусок находится на грани проскальзывания, то сила трения покоя достигает своего максимального значения: $F_{\text{тр}} = \mu N$.

С учётом условий равновесия (1) и (2) $\mu F = mg$.

Из последнего равенства находим:

$$m = \frac{\mu F}{g} = \frac{0,2 \cdot 300}{10} \text{ кг} = 6 \text{ кг}.$$

Ответ: $m = 6 \text{ кг}$.



ЗАДАЧА 3 Однородная балка массой 80 кг и длиной 2 м уравновешена в горизонтальном положении на опоре с помощью верёвки, прикреплённой к одному из концов балки. Верёвка вертикальна и другим концом прикреплена к потолку. С какой силой балка давит на опору, которая расположена на расстоянии 0,5 м от конца балки?

Дано:
 $m = 80 \text{ кг}$
 $L = 2 \text{ м}$
 $l = 0,5 \text{ м}$

$F = ?$

Решение:

На балку в вертикальном направлении действуют сила тяжести, сила натяжения верёвки и сила реакции опоры.

Запишем условие равновесия балки в проекции на вертикальную ось OY :

$$T + N - mg = 0. \quad (1)$$

В данной задаче уравнение равенства моментов сил удобно записать относительно точки опоры:

$$T(L-l) = mg\left(\frac{L}{2} - l\right).$$

Из этого уравнения находим силу натяжения верёвки:

$$T = mg \frac{L/2 - l}{L - l}.$$

Из равенства (1) получаем выражение для силы реакции опоры

$$N = mg - T = \frac{mgL}{2(L-l)}.$$

По третьему закону Ньютона сила давления балки на опору $F = N$. Подставив числовые значения, получим

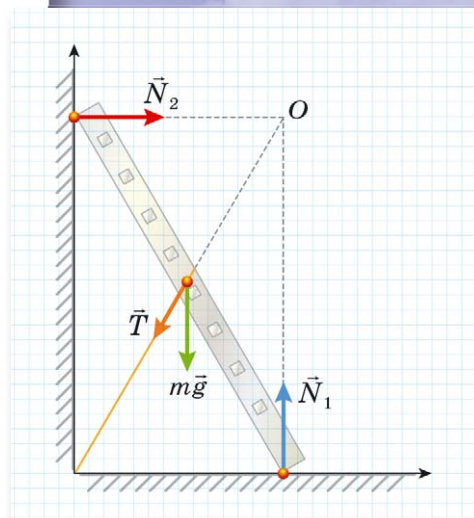
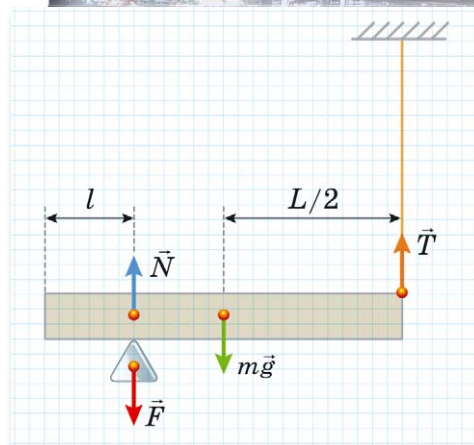
$$F = \frac{80 \cdot 10 \cdot 2}{2 \cdot 1,5} \text{ Н} \approx 533 \text{ Н}.$$

Ответ: $F \approx 533 \text{ Н}$.

ЗАДАЧА 4 Лестница, центр тяжести которой находится посередине, опирается своими концами на абсолютно гладкие пол и стену. К середине лестницы одним концом привязана верёвка, которая другим концом закреплена в углу комнаты. Можно ли путём изменения силы натяжения верёвки добиться устойчивого положения лестницы?

Решение:

Если тело находится в равновесии, то условие равенства нулю алгебраической суммы моментов сил, действующих на тело, должно выполняться относительно любой оси. Линии действия сил реакции опоры $\vec{N}_1$ и $\vec{N}_2$, а также силы натяжения $\vec{T}$ верёвки пересекаются в точке O . Поэтому момент каждой из этих сил относительно точки O равен нулю. Однако момент силы тяжести относительно той же точки не равен нулю. Поэтому равновесие лестницы невозможно ни при каком угле наклона.



ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

- Раздел механики, в котором изучают условия равновесия тел, называют статикой.
- Абсолютно твёрдое тело — физическая модель. Его форма и размеры остаются неизменными при любых внешних воздействиях.
- Центром масс тела называют точку пересечения прямых, вдоль которых должны быть направлены силы, чтобы тело двигалось поступательно.
- Невращающееся тело находится в равновесии, если равнодействующая сил, действующих на тело, равна нулю и если сумма проекций приложенных к нему сил на любую ось равна нулю.
- Правило моментов: при равновесии твёрдого тела, способного вращаться вокруг закреплённой оси, алгебраическая сумма моментов действующих на него сил относительно этой оси равна нулю.
- Устойчивость равновесия тела зависит от того, возникает или нет сила, возвращающая тело в исходное равновесное положение.

УСЛОВИЕ РАВНОВЕСИЯ

$$\vec{F}_{\text{тяж}} + \vec{N} = 0$$

$$\vec{F}_1 d_1 - \vec{F}_2 d_2 = 0$$

ПРАВИЛО МОМЕНТОВ

РАВНОВЕСИЕ ТЕЛ

ПОДРОБНЕЕ...

- Асламазов Л.Г. Статика. Вып. 11. / Л.Г. Асламазов. — М.: Наука, 1971. — (Библиотечка «Квант»).
- Том Тит. Продолжаем научные забавы: Интересные опыты, фокусы, самоделки. / Тит Том. — М.: ИД Мещерякова, 2007.
- Хилькевич С.С. Физика вокруг нас. Вып. 40. / С.С. Хилькевич. — М.: Наука, 1985. — (Библиотечка «Квант»).

ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

- Персонажи басни Крылова Лебедь, Рак и Щука тянут воз с одинаковыми силами. Как они должны тянуть, чтобы воз не мог сдвинуться с места даже при отсутствии сил трения между телегой и Землёй?
- По лестнице, опирающейся на гладкую стену, поднимается человек. Почему лестница начинает скользить только тогда, когда человек поднимется на определённую высоту?

Вся физика. Физический
энциклопедический словарь
<http://gotourl.ru/13730>

Политехнический музей
<http://gotourl.ru/13731>

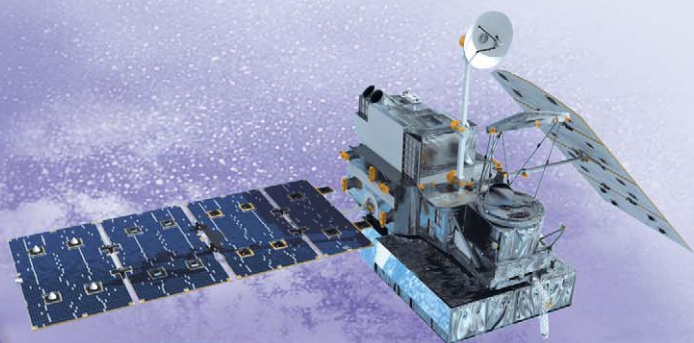




Глава 4

ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В МЕХАНИКЕ

- МЕХАНИЧЕСКАЯ РАБОТА
- МОЩНОСТЬ
- ЭНЕРГИЯ
- ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ
- КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ
- ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ. ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ
- РАБОТА СИЛ ТРЕНИЯ И МЕХАНИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ
- ИМПУЛЬС
- ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА
- РЕАКТИВНОЕ ДВИЖЕНИЕ
- РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ



РАЗДЕЛ I



МЕХАНИКА

КОРОТКО О ГЛАВНОМ...

Все встречающиеся в природе изменения происходят так, что если к чему-либо нечто прибавилось, то это отнимается у чего-то другого...

М. Ломоносов

ВЫ УЗНАЕТЕ:

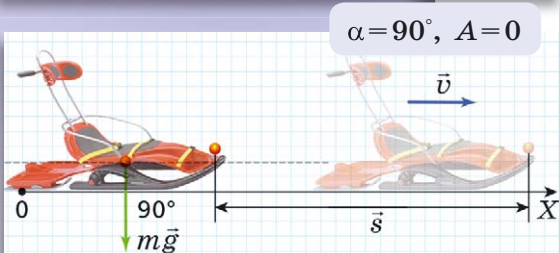
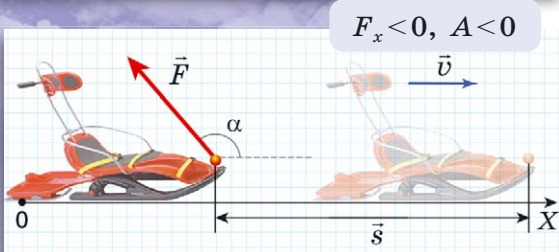
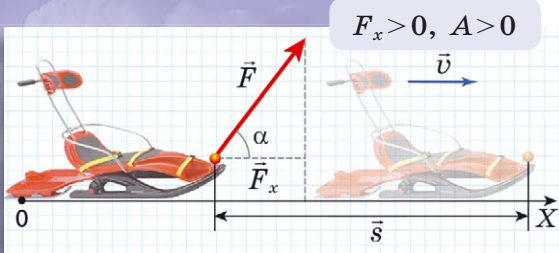
- Каково определение работы в общем случае.
- Как вычисляется работа в случае, если направление действия силы не совпадает с направлением перемещения.
- Как вычисляют работу в случае, если на тело действует несколько сил.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое сила и что такое перемещение?
- Каковы единицы работы?

Если обозначить величины: работа силы — A , модуль силы, действующей на тело, — $|\vec{F}|$, модуль перемещения тела — $|\vec{s}|$, угол между направлением силы и направлением перемещения — α , то работу рассчитывают по формуле

$$A = |\vec{F}| \cdot |\vec{s}| \cos \alpha.$$



Понятие работы в механике было введено в первой половине XIX в., когда начали широко применять всевозможные машины и механизмы, включая тепловые.

РАБОТА СИЛЫ С физической величиной, называемой **механической работой**, вы впервые познакомились в начальном курсе физики. Механическую работу можно рассматривать как меру действия силы, зависящую от численного значения силы, её направления, а также от перемещения тела под действием этой силы. Таким образом, в простейшем случае, когда тело движется прямолинейно и сила направлена параллельно направлению движения, работа равна произведению силы, действующей на тело, и пути, пройденного телом под действием этой силы:

$$A = Fs.$$

При этом если направление силы совпадает с направлением движения тела, то эта сила совершает **положительную** работу. Например, если тело падает вертикально вниз, то сила тяжести совершает положительную работу. Если же тело брошено вертикально вверх, то работа силы тяжести будет **отрицательной**.

Однако возникает вопрос: как рассчитать работу силы в случае, если направление действия силы составляет некоторый угол с направлением перемещения?

ОБЩЕЕ ВЫРАЖЕНИЕ ДЛЯ РАБОТЫ СИЛЫ Пусть санки перемещаются по горизонтальной поверхности под действием силы натяжения $\vec{F}$ верёвки, составляющей угол α с горизонтом. В этом случае работа силы будет уже определяться проекцией силы F_x на направление перемещения $\vec{s}$ санок. Поскольку $F_x = |\vec{F}| \cos \alpha$, то выражение для работы следует записать в виде

$$A = F_x |\vec{s}| = |\vec{F}| \cdot |\vec{s}| \cos \alpha.$$

Здесь необходимо сделать важное замечание: перемещение $\vec{s}$ в выражении для работы может быть вызвано разными причинами, но обязательно только воздействием той силы, работой которой мы интересуемся. Действительно, на тело может одновременно действовать несколько сил, и перемещение тела будет определяться их равнодействующей. Приведённая выше формула, разумеется, включает все частные случаи вычисления работы.

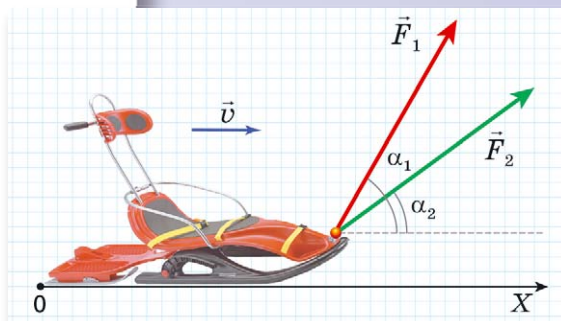
Действительно, если векторы $\vec{F}$ и $\vec{s}$ совпадают по направлению, то угол между ними равен нулю. Поскольку $\cos 0^\circ = 1$, то $A = |\vec{F}| \cdot |\vec{s}|$.

Если векторы $\vec{F}$ и $\vec{s}$ направлены противоположно друг другу, то $\alpha = 180^\circ$, $\cos 180^\circ = -1$ и работа $A = -|\vec{F}| \cdot |\vec{s}|$.

Если угол α острый, $\cos \alpha > 0$ и работа положительна: $A > 0$. Если угол α тупой, $\cos \alpha < 0$ и работа отрицательна: $A < 0$.

Возможен случай, когда направление силы, приложенной к телу, оказывается перпендикулярным направлению перемещения тела. В этом случае угол $\alpha = 90^\circ$, $\cos 90^\circ = 0$ и работа силы равна нулю: $A = 0$. Так, например, сила тяжести, действующая на санки, перпендикулярна направлению движения санок и поэтому работу не совершает.

Таким образом, **работа постоянной силы равна произведению модулей векторов силы и перемещения на косинус угла между ними.**



РАБОТА НЕСКОЛЬКИХ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ОДНО ТЕЛО

Для простоты рассмотрим случай, когда на тело действуют две силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, направленные соответственно под углами α_1 и α_2 к направлению перемещения. Очевидно, что совокупная работа этих сил равна алгебраической сумме работ, которые совершаются каждой из них:

$$A = A_1 + A_2 = |\vec{F}_1| \cdot |\vec{s}| \cos \alpha_1 + |\vec{F}_2| \cdot |\vec{s}| \cos \alpha_2 = (F_{1x} + F_{2x}) |\vec{s}|.$$

Эту работу можно выразить также через работу равнодействующей силы. Действительно, равнодействующая сила равна векторной сумме сил $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$ и может быть определена по правилу треугольника или параллелограмма. Как видно из построения, проекция равнодействующей силы F_x равна сумме проекций сил F_{1x} и F_{2x} :

$$F_x = F_{1x} + F_{2x}.$$

Поэтому выражение для полной работы можно записать в виде

$$A = F_x |\vec{s}| = (F_{1x} + F_{2x}) |\vec{s}|.$$

Таким образом, если на тело действует несколько сил, то полная работа всех сил равна работе равнодействующей силы.

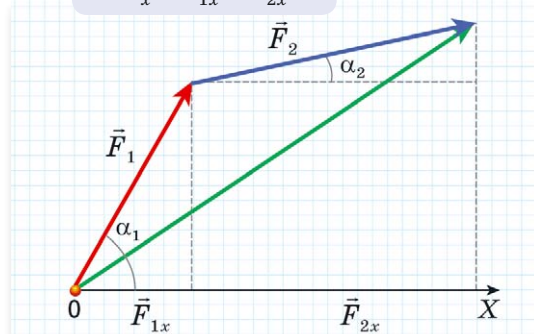
Необходимо помнить, что между работой равнодействующей силы и работой конкретной силы существуют различия. Например, тело под действием некоторой силы движется по шероховатой поверхности с постоянной скоростью. Поскольку тело движется без ускорения, то равнодействующая сила, равная векторной сумме данной силы и силы трения, равна нулю. Соответственно равна нулю и работа равнодействующей силы. Однако работа силы, под действием которой перемещается тело, имеет вполне конкретное значение.

В заключение напомним единицы работы в СИ: при $F = 1 \text{ Н}$, $|\vec{s}| = 1 \text{ м}$ и $\alpha = 0$ совершается работа

$$A = 1 \text{ Н} \cdot 1 \text{ м} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Эта единица работы — **джоуль** (Дж). Часто используют также кратную единицу работы — **килоджоуль**: $1 \text{ кДж} = 1000 \text{ Дж}$.

$$F_x = F_{1x} + F_{2x}$$



ВОПРОСЫ:

- Какую работу совершает штангист, удерживающий неподвижную штангу на вытянутых руках?
- В каком случае сила, приложенная к движущемуся телу, не совершает работу?
- На тело действуют две равные по модулю силы. В каком случае работа, совершённая равнодействующей силой, будет максимальной? минимальна?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Каково определение мощности.
- От каких физических характеристик зависит мощность.
- Что такое мгновенная мощность.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое механическая работа?
- В каких единицах измеряется работа и мощность?

При движении многих транспортных средств (ракеты, самолёты, быстроходные суда и т.п.) сила сопротивления, действующая на тела со стороны среды, не является постоянной, а растёт с увеличением скорости. В частности, при больших скоростях сила сопротивления воздуха пропорциональна квадрату скорости:

$$|\vec{F}_{\text{сопр}}| \sim v^2.$$

Такова же должна быть и зависимость силы тяги транспортного средства от скорости:

$$|\vec{F}_{\text{тяги}}| \sim v^2.$$

Поэтому мощность самолётных и судовых двигателей должна быть пропорциональна кубу скорости:

$$N \sim v^3.$$

Последнее означает, что для увеличения скорости судна, например, в 2 раза мощность его двигателя необходимо увеличить в 8 раз!

Введение понятия мощности было исторически обусловлено необходимостью оценивать производительность конструируемых тепловых машин. Производительность машины зависит от величины работы, которую она способна совершить за определённое время. Чем больше совершённая работа, тем производительнее машина. Очевидно, что большую работу может совершить даже двигатель игрушечного автомобиля, но для этого ему потребуется очень много времени. Поэтому наряду с работой вводят физическую величину, характеризующую быстроту, с которой работа совершается, — мощность.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ Из сказанного выше следует, что чем большую работу за единицу времени совершает машина, тем больше её мощность. **Мощностью** называют отношение работы A к интервалу времени Δt , за который эта работа совершена:

$$N = \frac{A}{\Delta t}.$$

Вспомним, что работа силы равна произведению проекции силы F_x на модуль перемещения тела: $A = F_x |\vec{s}|$. Само же перемещение зависит от скорости движения. Например, различные транспортные средства могут в течение длительного времени двигаться с постоянной скоростью. Это возможно в случае, если сила тяги, действующая на них за счёт работы двигателя, равна по модулю силе сопротивления, препятствующей движению.

В этой связи возникает закономерный вопрос: может ли скорость транспортного средства зависеть от мощности двигателя? Ответ утвердительный, в чём можно убедиться, если в формулу для мощности подставить выражение для работы:

$$N = \frac{F \cos \alpha |\vec{s}|}{\Delta t} = F v \cos \alpha,$$

где $v = \frac{|\vec{s}|}{\Delta t}$ — скорость тела; α — угол между направлением вектора силы и направлением вектора скорости.

Полученная формула показывает, что в том случае, если сила сопротивления движению постоянна, скорость тела пропорциональна мощности. Последнее объясняет, почему быстроходные транспортные средства снабжаются двигателями большой мощности.

Из формулы также видно, что при постоянной мощности двигателя сила тяги тем меньше, чем больше скорость. И наоборот, при уменьшении скорости сила тяги возрастает. Например, при подъёме автомобиля в гору водитель переходит на пониженную скорость, что приводит к увеличению силы тяги.

Если интервал времени Δt стремится к нулю, то отношение $\frac{|\vec{s}|}{\Delta t}$ представляет собой мгновенную скорость. Развиваемую при этом мощность называют **мгновенной**.



ЕДИНИЦЫ МОЩНОСТИ Поскольку единицей работы в СИ является джоуль, то в соответствии с определением единицей мощности в этой системе является мощность, при которой за 1 с совершается работа, равная 1 Дж. Эта единица — *ватт*: $1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/1 с}$. Часто используют кратные единицы мощности — *киловатт* (кВт) и *мегаватт* (МВт):

$$1 \text{ кВт} = 1000 \text{ Вт},$$

$$1 \text{ МВт} = 1000\,000 \text{ Вт}.$$

Иногда (в основном для характеристик мощности двигателей) используется старинная единица мощности — *лошадиная сила*:

$$1 \text{ л. с.} \approx 736 \text{ Вт}.$$

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ Лента транспортёра, составляющая угол 30° с горизонтом, равномерно поднимает ящик массой 100 кг на высоту 10 м за время 5 с. Какую мощность развивает при этом сила трения покоя, действующая на ящик со стороны ленты?

Дано:
 $m = 100 \text{ кг}$
 $h = 10 \text{ м}$
 $t = 5 \text{ с}$
 $\alpha = 30^\circ$

$N = ?$

Решение:

Как изображено на рисунке, на ящик действуют сила тяжести, сила трения покоя $\vec{F}_{\text{тр}}$ и сила упругости $\vec{F}_{\text{упр}}$ со стороны ленты.

Запишем условие равновесия ящика в проекции на направление движения:

$$F_{\text{тр}} - mg \sin \alpha = 0.$$

Выразим длину ленты через высоту подъёма:

$$s = \frac{h}{\sin \alpha}$$

и найдём скорость движения ящика:

$$v = \frac{s}{t} = \frac{h}{t \sin \alpha}.$$

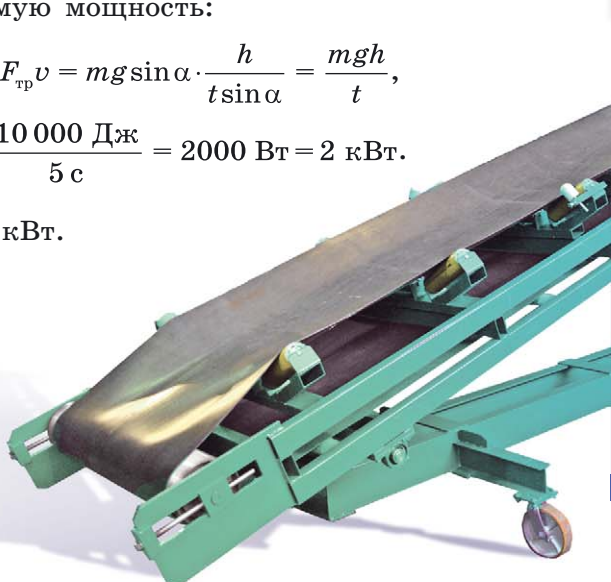
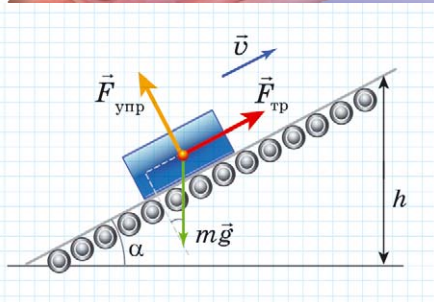
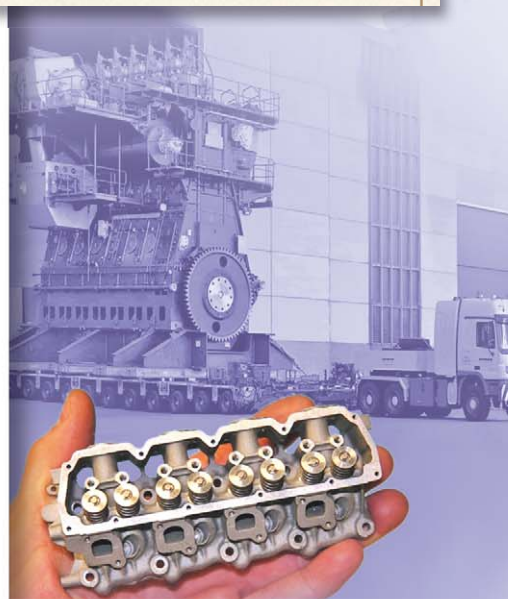
Вычислим искомую мощность:

$$N = F_{\text{тр}} v = mg \sin \alpha \cdot \frac{h}{t \sin \alpha} = \frac{mgh}{t},$$

$$N = \frac{10\,000 \text{ Дж}}{5 \text{ с}} = 2000 \text{ Вт} = 2 \text{ кВт}.$$

Ответ: $N = 2 \text{ кВт}$.

Мощности современных технических устройств изменяются в очень широком диапазоне: от тысячных долей ватта (миниатюрные микродвигатели) до нескольких тысяч мегаватт (крупные гидро- и атомные электростанции).



ВОПРОСЫ:

- Можно ли о мощности судить по совершённой работе?
- Зависит ли от времени мощность, развиваемая силой тяжести при свободном падении тела?
- Зачем гоночные автомобили снабжают очень мощными моторами?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое энергия.
- Какие виды энергии существуют.
- Как энергия связана с работой.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое механическая работа?



Герман Гельмгольц
(1821—1894)

Немецкий физик, математик, физиолог и психолог. Впервые математически обосновал закон сохранения энергии, установив его всеобщий характер.

Одним из наиболее важных понятий в физике является понятие энергии. Чёткое представление о том, что такое энергия, было сформулировано в 1847 г. немецким физиком Г. Гельмгольцем в связи с открытием закона сохранения энергии.

РАБОТА ВНЕШНИХ СИЛ И СОСТОЯНИЕ СИСТЕМЫ

Учёные, занимающиеся вопросами изучения энергии, обратили внимание на то, что совершение работы телом или системой тел обязательно связано с изменением их состояния. Например, поднятые над землёй грузы, а также механизмы, снабжённые сжатыми пружинами, способны совершать работу в течение определённого времени. Наглядным примером здесь может служить работа часов с пружинным механизмом. Закрученная спиральная пружина часов способна совершать работу в течение длительного времени, поддерживая при этом движение колёс, стрелок, балансира и т. д. Однако с течением времени состояние пружины меняется, и она уже не способна совершать работу. Аналогично поднятый на некоторую высоту и отпущенный груз копра при ударе о сваю останавливается, совершив работу по забиванию сваи в грунт. Для того чтобы система вновь была способна совершать работу, необходимо, чтобы внешние силы изменили состояние тел системы: подняли их вверх, увеличили их скорости, деформировали их и т. д. Последнее означает, что, для того чтобы система обладала энергией, внешние силы должны совершить над ней положительную работу.

Таким образом, если тело или система тел посредством действующих на них сил способны совершать работу, то говорят, что они обладают энергией.

КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ

Приведённый выше пример с забиванием сваи показывает, что движущиеся тела обладают энергией, которую называют **кинетической энергией**.

Рассмотрим первоначально покоящееся тело, на которое начинает действовать постоянная сила $\vec{F}$. Если на тело не действуют другие силы, то тело будет двигаться с ускорением $a = F/m$. Спустя время t скорость тела составит $v = at$, а модуль перемещения будет равен $|\vec{s}| = at^2/2$. При этом сила $\vec{F}$ совершит работу

$$A = F|\vec{s}| = ma \frac{at^2}{2} = m \frac{(at)^2}{2} = \frac{mv^2}{2}.$$

Результатом совершённой работы является приобретение телом энергии, связанной с его движением:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}.$$

В этом и заключается физический смысл кинетической энергии. Кинетическая энергия измеряется в тех же единицах, что и работа, т. е. в *джоулях*.



ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ

Понятие потенциальной энергии, зависящей от взаимного положения тел (или частей одного и того же тела), наиболее просто ввести, рассмотрев перемещение тела вблизи поверхности Земли.

Пусть тело под действием некоторой силы перемещается вверх из начального положения, характеризуемого высотой h_1 , в конечное положение, характеризуемое высотой h_2 . Будем считать движение тела очень медленным. При перемещении внешняя сила $\vec{F}$ совершит над телом работу $A = F|\vec{s}| = F(h_2 - h_1)$.

Очевидно, что сила тяжести в этом случае совершит отрицательную работу, равную по модулю работе силы $\vec{F}$:

$$A_{\text{тяж}} = -A = -(mgh_2 - mgh_1).$$

Опираясь на полученное равенство, можно сказать, что работа силы тяжести равна изменению физической величины $E_{\text{п}} = mgh$, взятому с противоположным знаком:

$$A_{\text{тяж}} = -(E_{\text{п}2} - E_{\text{п}1}).$$

Эту величину называют потенциальной энергией тела, поднятого на высоту h относительно поверхности Земли. При движении тела вниз сила тяжести будет совершать положительную работу, что приведёт к уменьшению его потенциальной энергии.

Потенциальная энергия, приобретённая телом, поднятым на некоторую высоту, может быть превращена в работу различными путями. В рассмотренном выше примере с забиванием сваи потенциальная энергия груза копра при падении превращается в кинетическую энергию, которая при ударе затрачивается на совершение работы.

Превращение потенциальной энергии в кинетическую можно пояснить на следующем примере (рис. а). Пусть тело, первоначально покоящееся ($v_1 = 0$) на высоте h_1 относительно поверхности Земли, начинает свободно падать вниз. Спустя некоторое время состояние тела будет характеризоваться высотой h_2 и скоростью v_2 . Согласно формуле кинематики можно записать:

$$v_{2y}^2 - v_{1y}^2 = -2g(y_2 - y_1) = 2g(y_1 - y_2), \quad (1)$$

где

$$y_1 - y_2 = h_1 - h_2. \quad (2)$$

Изменение потенциальной энергии, взятое по модулю:

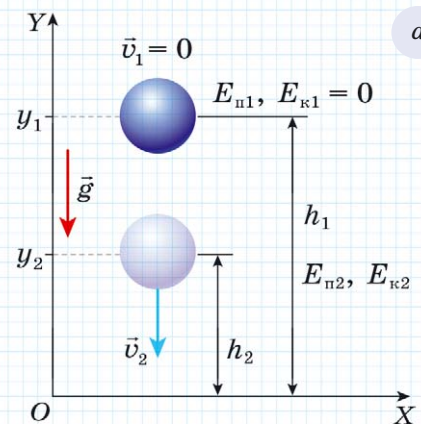
$$|E_{\text{п}2} - E_{\text{п}1}| = mg(h_1 - h_2).$$

С учётом формул (1) и (2) и того, что $v_{1y} = 0$, получим

$$|E_{\text{п}2} - E_{\text{п}1}| = mg \frac{v_2^2}{2g} = \frac{mv_2^2}{2}.$$

Таким образом, уменьшение потенциальной энергии тела оказалось равным приращению его кинетической энергии.

Очевидное понятие энергии можно обнаружить ещё в трактатах Аристотеля как причину некоего деятельного начала. Разумеется, это чисто философское толкование энергии не могло содержать каких-либо количественных характеристик.

**ВОПРОСЫ:**

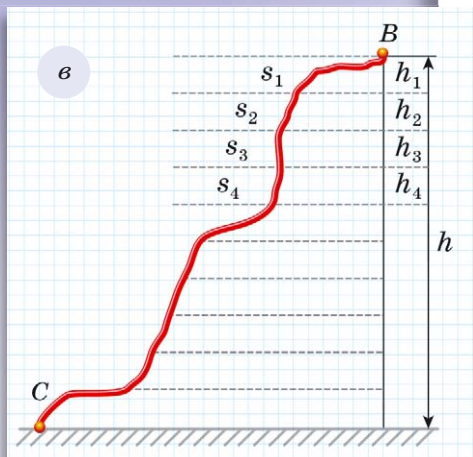
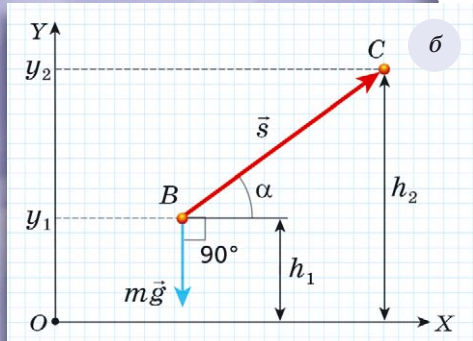
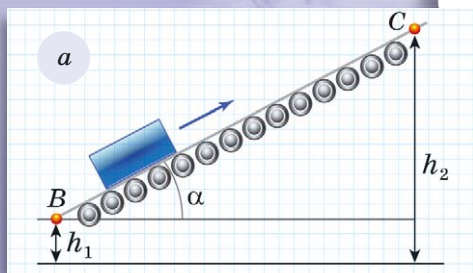
- Изменяется ли кинетическая энергия тела при изменении направления вектора его скорости?
- Как связана работа силы тяжести с потенциальной энергией тела?
- Как изменяется потенциальная энергия тела при его движении вверх?
- Чем отличается потенциальная энергия поднятого тела от кинетической энергии?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как вычислить работу силы тяжести в случае, если тело перемещается не по вертикали.
- Как вычислить работу, совершаемую силой упругости.
- Как рассчитать потенциальную энергию упруго деформированного тела.

ВСПОМНИТЕ:

- Как вычисляется работа силы?
- Что такое энергия?

**ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ**

Как вы уже знаете, при перемещении тела по вертикали выражение для работы силы тяжести имеет вид $A = mg(h_1 - h_2)$, где h_1 и h_2 — начальная и конечная высоты, характеризующие положение тела относительно поверхности Земли. Однако тело в поле тяжести Земли может перемещаться не только по вертикали.

РАБОТА СИЛЫ ТЯЖЕСТИ И ИЗМЕНЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ В ОБЩЕМ СЛУЧАЕ

Рассмотрим подъём тела на некоторую высоту с помощью транспортёра (рис. а). Как в этом случае рассчитать работу силы тяжести? Как при этом изменяется потенциальная энергия тела?

Чтобы ответить на эти вопросы, рассмотрим перемещение тела под действием некоторой силы вверх вдоль прямой BC. Будем считать, что начальная точка B находится на высоте h_1 над Землёй, а конечная точка C — на высоте h_2 .

Направим ось OY вертикально вверх, выбрав начало координат на поверхности Земли. Работу силы тяжести следует вычислять по полученной ранее формуле

$$A = mg|\vec{s}|\cos(90^\circ + \alpha) = -mg|\vec{s}|\sin\alpha.$$

Как видно из рисунка б, $|\vec{s}|\sin\alpha = y_2 - y_1$. Поэтому

$$A = -mg(y_2 - y_1) = -mgh,$$

где h — расстояние между точками B и C по вертикали. Таким образом, работа силы тяжести не зависит от того, как движется тело: по вертикали или вдоль линии BC, — результат получается одинаковый.



При погрузочных работах часто используют наклонную плоскость, поскольку для равномерного перемещения груза по наклонной плоскости сила, приложенная к грузу в направлении перемещения, меньше силы тяжести. Правда, при этом мы проигрываем в перемещении. Выигрыша в работе, как известно, наклонная плоскость, являющаяся одним из простых механизмов, дать не может.

Полученный результат можно обобщить на случай движения тела по произвольной траектории. Например, пусть тело движется по некоторому пути, форма которого изображена на рисунке в. Весь этот путь можно мысленно разделить на ряд малых участков s_1, s_2, s_3 и т.д., каждый из которых является маленькой наклонной плоскостью. Если обозначить изменения высот на отдельных участках через h_1, h_2, h_3 и т.д., то полную работу на всём пути можно найти, сложив все малые работы, совершаемые силой тяжести на каждом участке:

$$A = mgh_1 + mgh_2 + mgh_3 + \dots = mg(h_1 + h_2 + h_3 + \dots) = mgh.$$

Таким образом, работа силы тяжести не зависит от формы траектории, а зависит только от разности высот в начальном и конечном положениях.

Как вы уже знаете, работа силы тяжести может быть выражена через изменение потенциальной энергии, взятое со знаком «минус»:

$$A = -(E_{n2} - E_{n1}).$$

Отсюда следует, что изменение потенциальной энергии также не зависит от формы траектории.

Если при движении по некоторой траектории тело возвращается в исходную точку, то изменение его потенциальной энергии равно нулю. Последнее означает, что работа силы тяжести на замкнутой траектории равна нулю: при движении тела вверх работа отрицательна, а при движении вниз положительна.

РАБОТА СИЛЫ УПРУГОСТИ. ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ

УПРУГО ДЕФОРМИРОВАННОГО ТЕЛА

Как известно, сила упругости возникает при деформации тел. В качестве упругого тела рассмотрим пружину, левый конец которой закреплён, а к правому прикреплено тело. Растянем пружину, сместив тело вправо. При этом на тело со стороны пружины будет действовать сила упругости $F_{\text{упр}} = -kx$, где k — жёсткость пружины.

Если отпустить тело, пружина будет сжиматься. При этом сила упругости, действующая на тело, будет совершать работу. Хотя направления силы и перемещения совпадают, мы не можем в данном случае использовать полученную ранее формулу для вычисления работы, так как сила упругости при движении тела непрерывно изменяется.

Если в начальном положении значение силы по модулю равно kx , то после сокращения пружины будет равно $F_{\text{упр}} = 0$.

Поскольку сила упругости пропорциональна деформации пружины, для вычисления работы нужно взять среднее значение модуля силы и умножить его на модуль перемещения:

$$A = |\bar{F}_{\text{упр.ср}}| x = \frac{kx + 0}{2} x = \frac{kx^2}{2}.$$

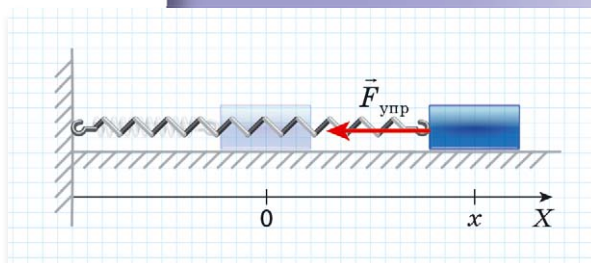
Таким образом, работа силы упругости пропорциональна квадрату деформации.

По аналогии с вычислением работы силы тяжести выражение для работы силы упругости можно записать в виде

$$A = -(E_{n2} - E_{n1}) = -(0 - \frac{kx^2}{2}),$$

где $E_{n1} = \frac{kx^2}{2}$ — потенциальная энергия пружины в начальном состоянии; E_{n2} — в конечном состоянии (поскольку в конечном состоянии пружина не деформирована, то $E_{n2} = 0$).

Так как удлинение пружины x является также и координатой конца пружины, то потенциальная энергия упруго деформированного тела зависит от координат.



Если обозначить величины: жёсткость пружины — k , деформация пружины — x , то потенциальную энергию упруго деформированного тела рассчитывают по формуле

$$E_n = \frac{kx^2}{2}.$$

ВОПРОСЫ:

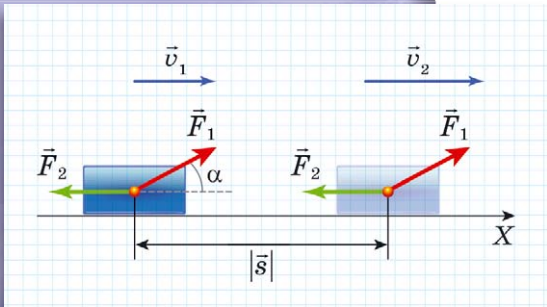
- Зависит ли работа силы тяжести от пути, пройденного телом?
- Как связана работа силы тяжести с потенциальной энергией тела?
- В чём сходство работ, совершаемых силой тяжести и силой упругости?
- Чему равна потенциальная энергия упруго деформированного тела?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как формулируется теорема об изменении кинетической энергии.
- Как работа силы зависит от системы отсчёта.
- Зависит ли кинетическая энергия от выбора системы отсчёта.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое работа?
- Что такое кинетическая энергия?
- Что такое потенциальная энергия?



Примечателен тот факт, что при выводе теоремы об изменении кинетической энергии использовалось лишь определение работы и второй закон Ньютона. Никаких предположений о характере сил, действующих на тело, при этом не было сделано. Этими силами, в частности, могут быть силы упругости, силы тяготения и силы трения.

Доказано также, что теорема об изменении кинетической энергии остаётся справедливой и в тех случаях, если на тело действуют переменные силы и если тело движется по криволинейной траектории.

КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ

На предыдущих уроках понятие кинетической энергии было введено на примере вычисления работы силы $\vec{F}$, действующей на первоначально покоящееся тело. Установим взаимосвязь между работой и изменением кинетической энергии в случае, если на уже движущееся тело начинает одновременно действовать несколько сил.

ТЕОРЕМА ОБ ИЗМЕНЕНИИ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Рассмотрим случай, когда на тело, движущееся со скоростью $\vec{v}_1$, начинают действовать две силы, знаки проекций которых на направление движения противоположны.

Суммарная работа этих сил

$$A = A_1 + A_2,$$

$$\text{где } A_1 = F_{1x}|\vec{s}| = |\vec{F}_1|\cos\alpha\cdot|\vec{s}|; A_2 = F_{2x}|\vec{s}| = -|\vec{F}_2|\cdot|\vec{s}|.$$

Следовательно,

$$A = (|\vec{F}_1|\cos\alpha - |\vec{F}_2|)\cdot|\vec{s}|.$$

Согласно второму закону Ньютона тело будет двигаться с ускорением $\vec{a}$, проекция которого

$$a_x = \frac{F_{1x} + F_{2x}}{m} = \frac{|\vec{F}_1|\cos\alpha - |\vec{F}_2|}{m}.$$

Используем далее формулу кинематики, устанавливающую взаимосвязь модулей перемещения, ускорения и квадратов начальной и конечной скоростей:

$$v_2^2 - v_1^2 = 2a_x|\vec{s}|.$$

С учётом этих формул выражение для работы примет вид

$$A = ma_x|\vec{s}| = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}.$$

Таким образом, работа сил равна разности кинетических энергий тела:

$$A = E_{k2} - E_{k1} = \Delta E_k.$$

Полученное равенство носит название **теоремы об изменении кинетической энергии: изменение кинетической энергии тела (материальной точки) равно работе сил, действующих на это тело**. Если силы совершают положительную работу, то $E_{k2} > E_{k1}$, т.е. кинетическая энергия тела увеличивается. Если же знак работы отрицательный, то $E_{k2} < E_{k1}$, т.е. кинетическая энергия уменьшается.

ЗАВИСИМОСТЬ МЕХАНИЧЕСКОЙ РАБОТЫ ОТ ВЫБОРА**СИСТЕМЫ ОТСЧЁТА**

Зависимость работы от выбора системы отсчёта можно наглядно продемонстрировать на следующем простом примере.

В вагоне поезда, движущегося с постоянной скоростью, на столе лежит пружина, один из концов которой закреплён. К свободному концу пружины прикреплено тело, на которое начинает действовать сила, в результате чего

пружина равномерно растягивается на величину l . Какую работу совершила эта сила в системе отсчёта, связанной с поездом, и в системе отсчёта, связанной с Землёй? При этом будем считать, что за время растяжения пружины поезд переместился на расстояние s .

В системе отсчёта, связанной с поездом, совершённая работа равна потенциальной энергии растянутой пружины:

$$A_1 = \frac{kl^2}{2}.$$

В системе отсчёта, связанной с Землёй, работа силы по растяжению пружины равна произведению средней силы $F_{\text{ср}} = kl/2$ на модуль перемещения точки приложения силы $s - l$:

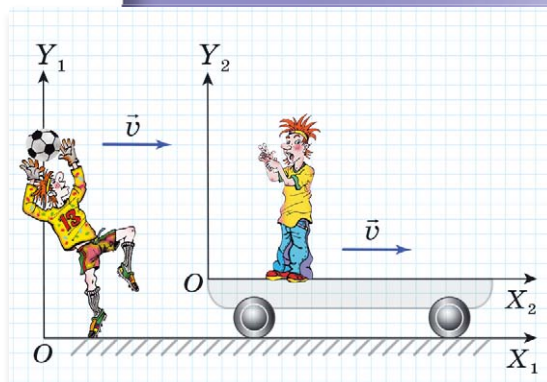
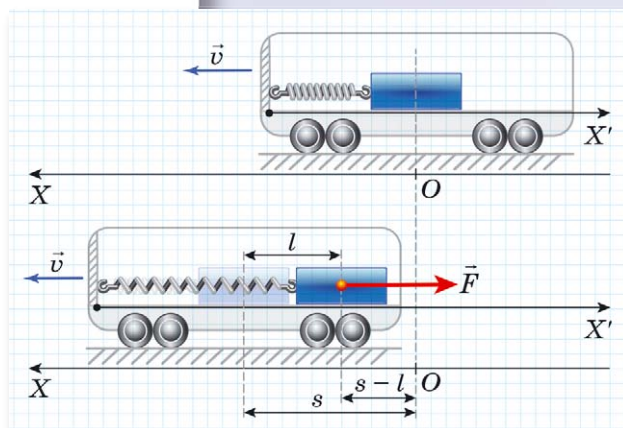
$$A_2 = -\frac{kl}{2}(s-l).$$

Очевидно, что эти работы не равны.

На первый взгляд мы получили неожиданный результат, поскольку в обеих системах отсчёта значение потенциальной энергии пружины одно и то же. На самом деле никакого парадокса не возникает, если учесть, что сила, действующая на пружину, является силой руки человека. Поэтому на пол вагона со стороны человека действует сила трения покоя, среднее значение которой также равно $kl/2$. Полная работа в системе отсчёта, связанной с Землёй, должна включать работу и этой силы. Сумма работы силы трения и работы A_2 равна

$$\frac{kl}{2}s - \frac{kl}{2}(s-l) = \frac{kl^2}{2}.$$

Полная работа в данной системе отсчёта оказалась той же, что и в системе отсчёта, связанной с поездом.



ЗАВИСИМОСТЬ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ОТ ВЫБОРА

СИСТЕМЫ ОТСЧЁТА

Поскольку скорость тела зависит от выбора системы отсчёта, то, очевидно, и кинетическая энергия зависит от системы отсчёта. Это можно понять на следующем примере.

Человек, стоящий на земле, бросает в горизонтальном направлении мяч массой m со скоростью $\vec{v}$. Поэтому в системе отсчёта X_1OY_1 , связанной с Землёй, начальная кинетическая энергия мяча равна $mv^2/2$. Однако с точки зрения наблюдателя, находящегося на движущейся со скоростью $\vec{v}$ тележке (движущаяся система отсчёта X_2OY_2), скорость мяча сразу после броска равна нулю, и, следовательно, его кинетическая энергия также равна нулю. Вместе с тем затраты мышечной энергии человека одинаковы в обеих системах отсчёта.

Более подробное рассмотрение данного примера показывает, что для разрешения этого противоречия необходимо учесть воздействие человека в момент броска на Землю.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Как будет изменяться кинетическая энергия тела, если работа равнодействующей сил положительна? отрицательна?
- В чём заключается физическая сущность теоремы об изменении кинетической энергии?
- Может ли полная работа всех сил зависеть от выбора системы отсчёта?
- Приведите пример, подтверждающий зависимость кинетической энергии от выбора системы отсчёта.

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- При каких условиях механическая энергия системы сохраняется.
- Зависит ли потенциальная энергия от выбора системы отсчёта.
- Зависит ли изменение механической энергии от выбора системы отсчёта.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое потенциальная энергия?
- Что такое кинетическая энергия?

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ. ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Рассмотренные выше примеры превращения одного вида механической энергии в другой позволяют сформулировать один из наиболее важных физических принципов — закон сохранения энергии.

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ Если на рассматриваемую систему тел никакие другие силы, кроме внутренних сил упругости или сил тяжести, не действуют, то работа этих сил определяет изменение потенциальной энергии системы. Поскольку речь идёт о законе сохранения механической энергии, то рассматриваются тела, которые взаимодействуют только друг с другом, образуя замкнутую систему. В результате взаимодействия этих тел могут изменяться как их скорости, так и координаты.

В качестве примера рассмотрим движение шарика, соединённого с одним концом упругой пружины, другой конец которой прикреплён к стенке. При этом поверхность, по которой движется шарик, будем считать гладкой. Пусть в начальный момент времени деформация x_1 пружины равна нулю, а шарiku сообщили начальную скорость $\vec{v}_1$. При движении шарика его кинетическая энергия будет убывать, поскольку действующая на него со стороны пружины сила упругости совершает отрицательную работу. Знак работы силы упругости свидетельствует о том, что потенциальная энергия пружины при этом увеличивается. Если в некоторый момент времени скорость шарика равна $\vec{v}_2$, то изменение его кинетической энергии

$$\Delta E_k = \Delta E_{k2} - \Delta E_{k1} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}. \quad (1)$$

Работа силы упругости $A_{\text{упр}}$ равна изменению потенциальной энергии пружины, взятому со знаком «минус»:

$$A_{\text{упр}} = -\Delta E_{\text{п}} = -\left(\frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2}\right), \quad (2)$$

где x_2 — деформация пружины в рассматриваемый момент времени.

Работа силы упругости также равна изменению кинетической энергии шарика: $A_{\text{упр}} = \Delta E_k$. Поэтому с учётом формулы (2) можно записать:

$$\Delta E_k = -\Delta E_{\text{п}}, \text{ или } \Delta E_k + \Delta E_{\text{п}} = 0.$$

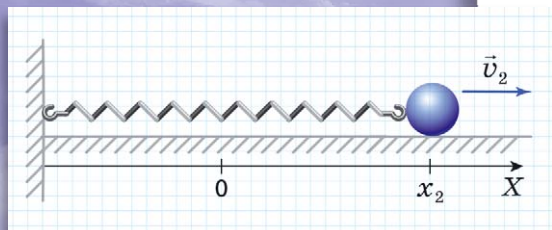
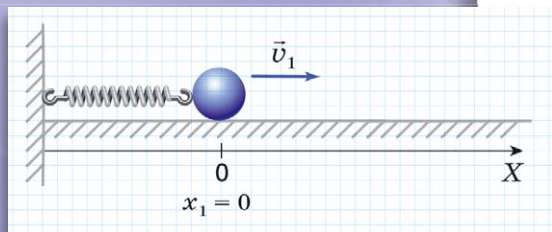
Последнее равенство означает, что $\Delta(E_k + E_{\text{п}}) = 0$, т.е. изменение суммы кинетической и потенциальной энергий равно нулю. Сумму кинетической и потенциальной энергий системы называют **механической энергией системы**:

$$E = E_k + E_{\text{п}} = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2}. \quad (3)$$

Если обозначить величины: кинетическая энергия — E_k , потенциальная энергия — $E_{\text{п}}$, то полная механическая энергия замкнутой системы тел

$$E = E_k + E_{\text{п}}$$

сохраняется неизменной.



Так как изменение полной механической энергии равно нулю, то эта энергия остаётся постоянной:

$$E = E_k + E_{\pi} = \text{const.}$$

Таким образом, *в замкнутой системе, в которой действуют только силы тяжести и силы упругости, механическая энергия сохраняется.* В этом и заключается сущность одного из наиболее важных физических принципов — **закона сохранения энергии.**

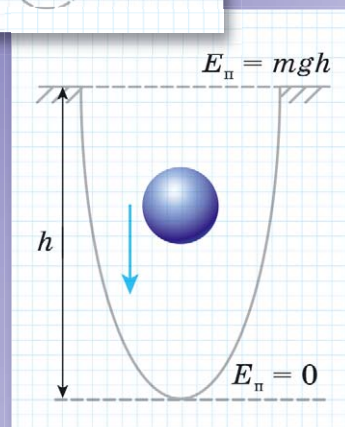
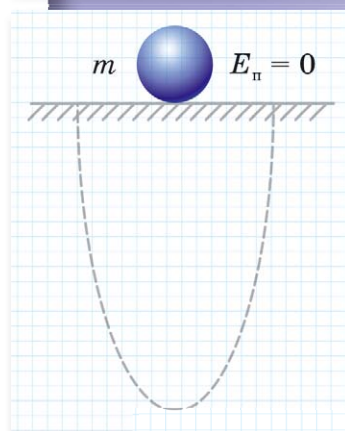
ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ Кинетическая энергия тела зависит от выбора системы отсчёта. Зависит ли от выбора системы отсчёта потенциальная энергия? Рассмотрим пример, когда тело лежит на поверхности Земли. Всегда ли потенциальная энергия этого тела равна нулю? Представим себе, что в том месте, где находится тело, в земле образовалась яма. Очевидно, что при падении в яму тело будет увеличивать свою кинетическую энергию. Поэтому можно утверждать, что увеличение кинетической энергии тела осуществляется за счёт уменьшения его потенциальной энергии, отсчитываемой, например, относительно дна ямы. Абсолютное значение потенциальной энергии зависит от положения уровня, принятого за начало отсчёта энергии.

Важно подчеркнуть, что абсолютное значение потенциальной энергии не имеет реального физического смысла: при решении задач важна лишь разность потенциальных энергий для двух положений тела. Нулевой уровень отсчёта потенциальной энергии можно выбирать произвольно с учётом удобного способа решения задачи. При этом возможна ситуация, когда тело находится ниже нулевого уровня и его координата отрицательна. В этом случае отрицательной будет и потенциальная энергия тела. Однако *изменение потенциальной энергии, а также совершённая при этом работа не зависят от выбора нулевого уровня.*

Тот факт, что абсолютное значение потенциальной энергии зависит от выбора нулевого уровня отсчёта энергии, вовсе не означает её зависимости от выбора системы отсчёта. На первый взгляд это может показаться странным, поскольку изменение потенциальной энергии определяется работой потенциальных сил $\Delta E_{\pi} = -A$, а сама работа зависит от выбора системы отсчёта. На самом деле здесь нет никакого противоречия, нужно лишь вспомнить, что потенциальная энергия есть энергия взаимодействия двух тел, например, рассматриваемого тела и Земли. Поэтому и изменение потенциальной энергии будет определяться суммарной работой сил, действующих на тела системы. То, что суммарная работа потенциальных сил не зависит от выбора системы отсчёта, особенно наглядно видно на примере работы сил упругости системы, состоящей из двух тел, соединённых пружиной. Действительно, работа сил упругости определяется деформацией пружины, но величина деформации не может зависеть от выбора системы отсчёта.

Мы должны, таким образом, рассматривать энергию системы тел как величину, в отношении которой мы можем лишь установить, происходит ли её увеличение или уменьшение при переходе системы из одного определённого положения в другое. Абсолютная величина энергии нам неизвестна, и это не имеет для нас значения, поскольку все явления определяются изменениями энергии, а не её абсолютной величиной.

Дж. Максвелл



ВОПРОСЫ:

- В чём заключается относительный характер механической энергии?
- Что такое полная механическая энергия тела или системы тел?
- Как формулируется закон сохранения механической энергии?

РАБОТА СИЛ ТРЕНИЯ И МЕХАНИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Чем отличается работа силы трения от работы других механических сил.
- Какое влияние оказывает работа силы трения на механическую энергию системы.
- Выполняется ли закон сохранения механической энергии в случае, если в системе действуют силы трения.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое сила трения?
- Что такое механическая работа?
- В чём заключается особенность работы, совершаемой силами тяжести и упругости?

Проведём простой опыт по соскальзыванию бруска с наклонной плоскости. С какой бы высоты мы ни отпускали его и независимо от степени гладкости поверхности, по которой скользит брусок, его движение после соскальзывания обязательно прекратится. Возникают вопросы: на что исчерпался запас потенциальной энергии, которой брусок обладал первоначально? Почему механическая энергия тела в конечном состоянии оказалась равной нулю?

РАБОТА СИЛЫ ТРЕНИЯ Как известно, сила трения скольжения возникает только при относительном движении соприкасающихся тел и направлена противоположно вектору относительной скорости. Характерно, что ни от координат, ни от взаимного расположения тел сила трения не зависит. Следовательно, работу силы трения нельзя выразить через изменение потенциальной энергии тела или системы тел.

Вместе с тем работу силы трения можно вычислить, если воспользоваться теоремой об изменении кинетической энергии.

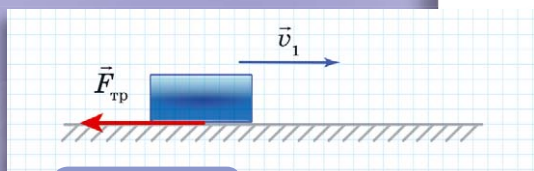
Рассмотрим случай, когда телу, лежащему на горизонтальной поверхности, толчком сообщили начальную скорость $\vec{v}_1$. При этом на тело со стороны плоскости будет действовать сила трения, направленная противоположно вектору скорости. Если через некоторое время скорость тела стала равной $\vec{v}_2$, то $|\vec{v}_2| < |\vec{v}_1|$. При этом работа силы трения

$$A_{\text{тр}} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2},$$

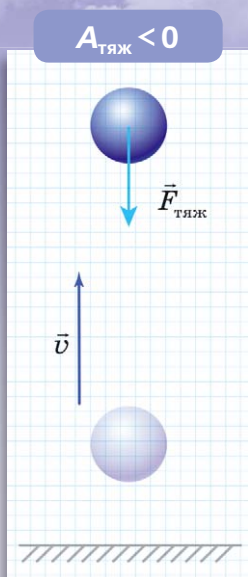
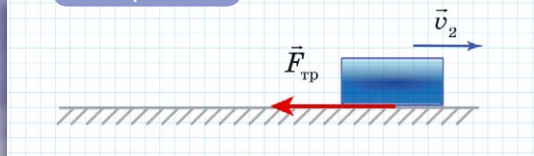
где m — масса тела.

Очевидно, что работа силы трения отрицательна. В этой связи следует отметить принципиальное отличие работы силы трения от работы силы тяжести или силы упругости. Например, если тело бросить вверх с поверхности Земли, то сила тяжести совершит отрицательную работу, в результате чего потенциальная энергия тела увеличится. При падении тела на поверхность Земли сила тяжести совершит положительную работу, равную модулю работы этой силы при движении вверх. Полная же работа силы тяжести по замкнутой траектории равна нулю, о чём уже говорилось ранее.

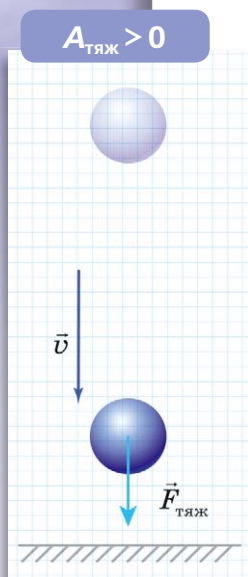
Совсем иная ситуация наблюдается в случае движения тела под действием силы трения: уменьшение кинетической энергии не приводит к её превращению в потенциальную энергию. Поэтому тело после остановки двигаться в обратном направлении не может, на это просто нет запаса механической



$$A_{\text{тр}} < 0$$



$$A_{\text{тяж}} < 0$$



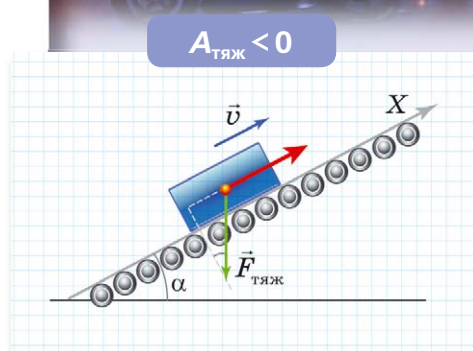
$$A_{\text{тяж}} > 0$$

энергии. Поскольку сила трения всегда направлена против вектора скорости, то работа силы трения при движении по замкнутой траектории не равна нулю. В этом заключается важное отличие *потенциальных сил* (сила тяжести и сила упругости) от *непотенциальных* (сила трения и сила сопротивления среды).

Чтобы более наглядно представить себе различие между потенциальными и непотенциальными силами, рассмотрим ещё один пример движения тела под действием силы трения.

Пусть тело равномерно поднимается вверх с помощью ленты транспортёра. При этом на тело в направлении движения действует сила трения покоя. По мере перемещения тела вверх его потенциальная энергия увеличивается. Можно ли утверждать, что увеличение потенциальной энергии произошло за счёт работы силы трения?

Ответ, конечно, должен быть отрицательным, поскольку сила трения не является потенциальной и не может изменять потенциальную энергию тела. В рассматриваемом случае увеличение потенциальной энергии обусловлено отрицательной работой составляющей силы тяжести в проекции на направление ленты транспортёра. Очевидно, что сила трения покоя совершит такую же работу, но положительную.



Можно привести любопытный пример действия силы трения. Если автомобиль начинает разгоняться из состояния покоя, то внешней силой, сообщаящей ускорение автомобилю, является сила трения покоя. Однако никакой работы при этом сила трения покоя не совершает (при условии отсутствия проскальзывания колёс).

РАБОТА СИЛ ТРЕНИЯ И ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Рассмотренный выше случай движения тела по горизонтальной поверхности под действием силы трения наглядно свидетельствует о нарушении закона сохранения механической энергии: кинетическая энергия тела уменьшается, а потенциальная взамен не появляется. Этот вывод носит общий характер: в любых замкнутых системах, состоящих из макроскопических тел, механическая энергия обязательно убывает.

Действительно, если не поддерживать извне колебания маятника, то они постепенно затухнут, пущенная по льду шайба обязательно остановится через некоторое время и т. д.

Вместе с тем убыль механической энергии не может происходить бесследно. На самом деле остаётся неизбежным всеобщий закон сохранения энергии: энергия из механической формы переходит в другую форму, а именно во внутреннюю энергию движения частиц, из которых состоят трущиеся тела.

Например, когда мы чиркаем спичкой по коробку, то в результате нагревания головка спички воспламеняется.



ВОПРОСЫ:

- На тело действует сила трения. Может ли работа этой силы быть равной нулю?
- В системе тел действует несколько сил трения. Может ли какая-либо из них совершать положительную работу?
- Как изменяется механическая энергия тела, когда на него действует сила трения скольжения?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое импульс материальной точки.
- Какова другая форма записи второго закона Ньютона.

ВСПОМНИТЕ:

- Как формулируется второй закон Ньютона?
- Как складываются векторные физические величины?

Импульсом тела называют векторную физическую величину, равную произведению массы тела на скорость его движения:

$$\vec{p} = m\vec{v}.$$

При этом под телом здесь понимается **материальная точка**.

ИМПУЛЬС

Как известно, основная задача механики заключается в определении положения тела в произвольный момент времени. Эта задача может быть решена на основе законов Ньютона, если заданы начальные координаты и начальные скорости, а также известны силы, действующие на тело. Однако на практике это не всегда возможно. Например, в микромире, мире элементарных частиц, характер сил, как правило, неизвестен. Тем не менее многие задачи механики, а также задачи взаимодействия между микрочастицами можно решить, не зная ничего об этих силах. Это возможно благодаря тому, что в механике существуют физические величины, которые сохраняются при определённых условиях. Одной из таких величин является импульс тела (материальной точки).

ИМПУЛЬС МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ В качестве примера рассмотрим изменение характера движения тела массой m , на которое в течение времени Δt действовала некоторая сила $\vec{F}$. В частности, это может быть бильярдный шар, по которому был нанесён удар кием.

По второму закону Ньютона

$$\vec{F} = m\vec{a}.$$

Согласно определению ускорения

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t},$$

где $\vec{v}_0$ — начальная скорость шара; $\vec{v}$ — его конечная скорость.

Подставив выражение для ускорения в формулу второго закона Ньютона, получим

$$\vec{F} = m \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t}. \quad (1)$$

Перепишем формулу (1) в более удобном для дальнейшего анализа виде:

$$\vec{F}\Delta t = m\vec{v} - m\vec{v}_0. \quad (2)$$

Правая часть равенства (2) представляет собой изменение величины, равной произведению массы тела на его скорость. Эта физическая величина имеет особое название — **импульс тела** или **количество движения тела**. Импульс тела обозначают буквой $\vec{p}$:

$$\vec{p} = m\vec{v}. \quad (3)$$

Важно подчеркнуть, что импульс тела — векторная величина. Направление вектора импульса совпадает с направлением вектора скорости тела.

В соответствии с определением (3) единицей импульса в СИ является **килограмм на метр в секунду** ($1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$).

Таким импульсом обладает тело массой 1 кг, движущееся со скоростью 1 м/с.

Импульсом могут обладать все формы материи, а не только частицы вещества. Понятие импульса используют, например, для описания характеристик физических полей, в частности электромагнитных волн.

ДРУГАЯ ФОРМА ЗАПИСИ ВТОРОГО ЗАКОНА НЬЮТОНА

Равенство (2) позволяет нам сформулировать основной закон динамики материальной точки так, как это сделал сам И. Ньютон: «Изменение количества движения пропорционально приложенной движущей силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует».

Если изменение импульса обозначить символом $\Delta \vec{p}$, то формулу (2) можно записать в виде

$$\vec{F} \Delta t = \Delta \vec{p}. \quad (4)$$

Векторную физическую величину, равную произведению силы на время её действия, называют **импульсом силы**. Единица импульса силы в СИ — *ньютон на секунду* (1 Н·с).

Не следует отождествлять изменение импульса $\Delta(m\vec{v})$ тела с импульсом силы $\vec{F} \Delta t$, поскольку это совершенно разные понятия.

Таким образом, равенство (4) позволяет переформулировать закон Ньютона следующим образом: **сила равна изменению импульса в единицу времени:**

$$\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}.$$

Строго говоря, формула (4) справедлива только в том случае, если сила $\vec{F}$ в течение её времени действия остаётся постоянной.

Вместе с тем если время, в течение которого действует сила, очень мало (при столкновении тел или при ударе), то формулой (4) можно воспользоваться для оценки средней силы, действующей на тело.

ИМПУЛЬС СИСТЕМЫ МАТЕРИАЛЬНЫХ ТОЧЕК

При нахождении суммарного импульса системы материальных точек необходимо учитывать векторный характер импульсов отдельных точек.

Следовательно, **импульс системы материальных точек равен векторной сумме импульсов всех точек.**

В качестве примера найдём суммарный импульс двух материальных точек массами m_1 и m_2 , движущихся со скоростями $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$ во взаимно противоположных направлениях:

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2.$$

С учётом знаков проекций импульсов точек на выбранное направление оси OX проекция суммарного импульса

$$p_x = p_{1x} + p_{2x} = m_1 v_1 - m_2 v_2.$$

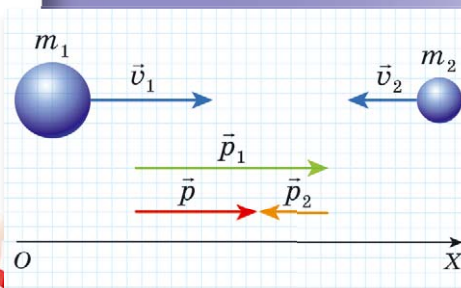


Рене Декарт

(1596—1650)

Французский философ, математик, физик и физиолог.

Понятие количества движения как произведения массы тела на величину его скорости впервые было введено в физике в XVII в. Р. Декартом при изучении им законов механического движения. Но он не рассматривал количество движения как векторную величину.



ВОПРОСЫ:

- Что называют импульсом материальной точки?
- Что называют импульсом силы?
- Как формулируется второй закон Ньютона через понятие импульса?
- Чему равен импульс системы двух материальных точек равной массы, движущихся навстречу друг другу с равными по модулю скоростями?

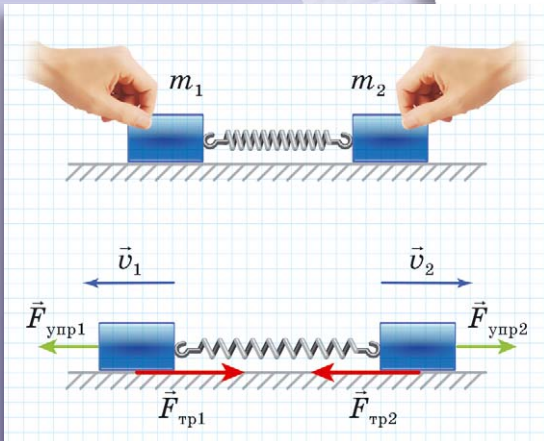
ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как формулируется закон сохранения импульса.
- Можно ли использовать закон сохранения импульса в случае, когда система тел не является замкнутой.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое замкнутая система тел?
- Что такое импульс тела и импульс силы?
- Как формулируются второй и третий законы Ньютона?



В самых обычных ситуациях мы можем наблюдать, что в результате взаимодействия тел их скорости изменяются как по модулю, так и по направлению. Например, попробуйте выпрыгнуть из покоящейся лёгкой лодки на берег. Насколько легко это сделать? Почему это происходит иначе, если на берег выпрыгивать из тяжело нагруженной лодки? В механике часто встречаются задачи, в которых изучается взаимодействие друг с другом нескольких тел. Характерный пример — описание движения бильярдных шаров до и после их столкновения. На самом деле в каждом из приведённых примеров изменяются направления и модули импульсов тел.

ИЗМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСА СИСТЕМЫ ТЕЛ

Рассмотрим систему двух тел массами m_1 и m_2 , соединённых сжатой пружиной, которые первоначально удерживаются на горизонтальной плоскости. После освобождения тел на каждое из них в горизонтальном направлении будут действовать сила упругости со стороны пружины и сила трения со стороны поверхности. Пренебрегая изменением силы упругости за малое время Δt после начала движения, уравнение второго закона Ньютона для каждого из тел можно записать в виде

$$(\vec{F}_{\text{упр1}} + \vec{F}_{\text{тр1}})\Delta t = m_1 \vec{v}_1, \quad (1)$$

$$(\vec{F}_{\text{упр2}} + \vec{F}_{\text{тр2}})\Delta t = m_2 \vec{v}_2, \quad (2)$$

где $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$ — скорости, которые приобрели тела через время Δt .

Сложим почленно левые и правые части равенств (1) и (2):

$$(\vec{F}_{\text{упр1}} + \vec{F}_{\text{упр2}} + \vec{F}_{\text{тр1}} + \vec{F}_{\text{тр2}})\Delta t = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2. \quad (3)$$

Суммирование в левой части равенства (3) существенно упрощается, так как на основе третьего закона Ньютона

$$\vec{F}_{\text{упр1}} = -\vec{F}_{\text{упр2}}, \quad \text{т.е.} \quad \vec{F}_{\text{упр1}} + \vec{F}_{\text{упр2}} = 0.$$

Правая часть равенства (3), по сути, представляет собой изменение суммарного импульса системы, так как тела первоначально покоились:

$$\Delta \vec{p} = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2.$$

В результате формулу (3) можно записать в более компактном виде:

$$(\vec{F}_{\text{тр1}} + \vec{F}_{\text{тр2}})\Delta t = \Delta \vec{p}. \quad (4)$$

Формула (4), полученная для частного случая движения тел, на самом деле позволяет сформулировать следующий важный вывод: суммарный импульс системы тел могут изменить только внешние силы. Внутренние силы, в данном случае силы упругости, действующие



Суммарный импульс системы тел могут изменить только внешние силы:

$$\Delta \vec{p} = (\vec{F}_{\text{внеш1}} + \vec{F}_{\text{внеш2}} + \dots)\Delta t.$$

Внутренние силы не могут изменить суммарный импульс системы тел.

на тела со стороны пружины, изменяя импульсы отдельных тел, не могут изменить суммарный импульс системы. Заметим, что уравнение (4) остаётся справедливым для любого интервала времени, если сумма внешних сил не изменяется.

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА Рассмотрим столкновение двух тележек одинаковой массы m , к торцам которых прикреплены кусочки пластилина. Пусть при этом тележки движутся навстречу друг другу с равными по модулю скоростями v . Для этого необходимо запустить тележки с наклонной плоскости с одинаковой высоты. Как показывает опыт, после столкновения тележки остановятся.

Этот результат объяснить несложно. До столкновения импульс тележки, движущейся слева направо, равен $m\vec{v}$, а движущейся справа налево равен $-m\vec{v}$. Следовательно, их суммарный импульс равен нулю. Поскольку после столкновения тележки остановились, их суммарный импульс также равен нулю.

Данный опыт можно видоизменить, столкнув тележки обращёнными друг к другу пружинными буферами. После столкновения тележки разъедутся в противоположные стороны, сохранив то же самое по модулю значение скорости, которой обладала каждая из тележек до взаимодействия.

Результаты опыта наглядно свидетельствуют о том, что и в этом случае суммарный импульс тел не изменится: до и после взаимодействия он равен нулю. Поскольку силы трения, действующие на тележки, пренебрежимо малы, а силы тяжести уравновешиваются силами реакции со стороны поверхности, то данную систему тел можно считать замкнутой.

Рассмотренные выше частные случаи сохранения суммарного импульса позволяют сформулировать закон, имеющий фундаментальный характер: **векторная сумма импульсов тел, составляющих замкнутую систему, остаётся постоянной при любых движениях и взаимодействиях тел этой системы.**

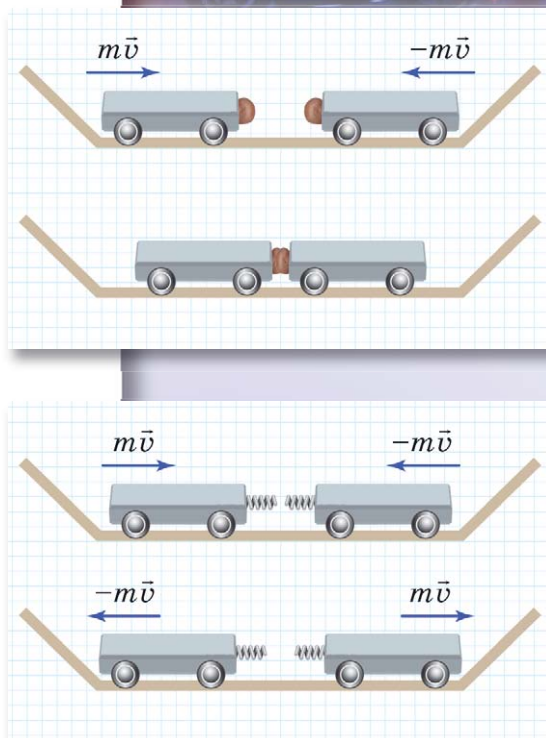
Закон сохранения импульса непосредственно следует из формулы (4), если внешние силы отсутствуют (система замкнута) или если векторная сумма внешних сил равна нулю:

$$\Delta \vec{p} = 0.$$

Последнее равенство можно переписать в более явном виде:

$$\vec{p}_{0_1} + \vec{p}_{0_2} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2. \quad (5)$$

В формуле (5) левая часть равенства представляет собой суммарный импульс тел до взаимодействия, а правая — их суммарный импульс после взаимодействия.



Векторная сумма импульсов

тел, составляющих замкнутую систему, остаётся постоянной при любых взаимодействиях тел этой системы между собой:

$$\vec{p}_{0_1} + \vec{p}_{0_2} + \dots = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots$$

ВОПРОСЫ:

- Почему при выстреле из огнестрельного оружия существует явление отдачи?
- Какие силы, внешние или внутренние, могут изменять суммарный импульс системы?
- Как формулируется закон сохранения импульса?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое реактивное движение.
- На чём основан принцип движения ракеты.
- Какие успехи достигнуты человечеством в освоении космического пространства.

ВСПОМНИТЕ:

- Как формулируется закон сохранения импульса?
- Что такое искусственные спутники Земли?

Ещё до изобретения парохода существовал проект судна, движущегося на основе реактивного принципа: запас воды на судне предполагалось выбрасывать с помощью сильного нагнетательного насоса в кормовой части, вследствие чего судно должно было двигаться вперёд.

Константин Эдуардович Циолковский
(1857—1935)

Русский учёный. В 1903 г. впервые предложил конструкцию космической ракеты с жидкостным реактивным двигателем.

РЕАКТИВНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Каждый из нас может в домашних условиях провести следующий простой опыт. Если удерживать шланг душа рукой в вертикальном положении и опустить при этом разбрызгиватель (лейку) душа вниз в ванну, после включения воды можно увидеть, что шланг заметно отклонился в сторону, противоположную направлению струи воды. Это явление основано на так называемом реактивном движении.

РЕАКТИВНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Реактивным движением называют движение тела, возникающее при отделении некоторой его части с какой-либо скоростью относительно тела. При этом на тело будет действовать реактивная сила, сообщающая ему ускорение. Главная отличительная особенность реактивной силы заключается в том, что она возникает без какого-либо взаимодействия с окружающими телами. Характерный пример — движение ракеты в космическом пространстве. В космосе нет среды в общепринятом смысле, поэтому взаимодействие происходит лишь между ракетой и вылетающими из неё газами.

До включения двигателя ракеты суммарный импульс ракеты и топлива равен нулю. Согласно закону сохранения импульса суммарный импульс системы, состоящей из ракеты и вылетающих газов, должен остаться неизменным, т.е. равным нулю:

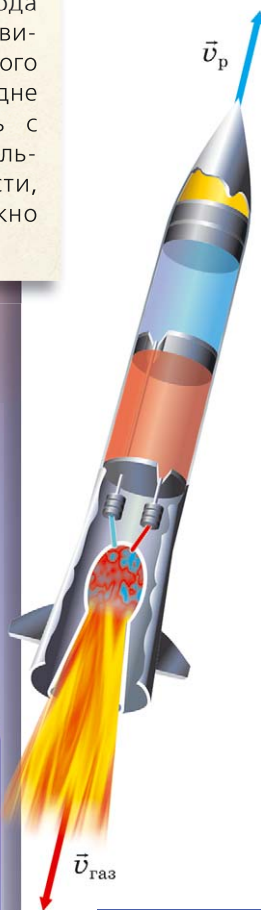
$$m_p v_p - m_{\text{газ}} v_{\text{газ}} = 0,$$

где m_p и $m_{\text{газ}}$ — массы ракеты и сгоревшего топлива; v_p и $v_{\text{газ}}$ — скорости ракеты и выбрасываемых газов.

Закон сохранения импульса позволяет найти скорость движения ракеты, если известна скорость истечения газов. Правда, это касается случая, когда расширяющиеся газы вылетают из ракеты сразу целиком. На самом деле сгорание топлива происходит постепенно, и полная масса ракеты с течением времени уменьшается. Поэтому приходится решать задачу о движении тела с переменной массой. Получающиеся при этом уравнения движения ракеты оказываются весьма сложными. Заметим, что принципы реактивного движения активно проявляются в живой природе. Например, осьминоги, каракатицы и кальмары движутся благодаря тому, что всасывают внутрь себя воду, а затем с силой выбрасывают её наружу.

УСПЕХИ В ОСВОЕНИИ КОСМОСА

Освоение околоземного космического пространства, не говоря уже о межпланетных полётах, немыслимо без развития космической тех-



ники, и прежде всего без создания мощных ракетополетителей. Основы теории реактивного движения, а также конструкцию космической ракеты с жидкостным реактивным двигателем впервые предложил в 1903 г. русский учёный К. Э. Циолковский в своей работе «Исследование мировых пространств реактивными приборами».

Циолковский также научно обосновал возможность осуществления межпланетных полётов и создал теорию движения многоступенчатых ракет. Каждая из ступеней такой ракеты снабжена собственным двигателем и баком с топливом. Когда топливо сгорает, отработанная ступень отстреливается и в работу включается следующая ступень. Именно такие ракеты теперь в основном используют в космонавтике.

Первым эпохальным событием в истории освоения космоса явился запуск в октябре 1957 г. нашей страной первого искусственного спутника Земли. Следующим важным этапом покорения космического пространства стал вывод на околоземную орбиту корабля с человеком на борту. Этим человеком, впервые шагнувшим в космос 12 апреля 1961 г., был наш соотечественник Ю. А. Гагарин. Полёты в космос были осуществлены на ракетных комплексах, сконструированных нашими учёными и инженерами под руководством С. П. Королёва.

Выдающиеся достижения в освоении космоса принадлежат также американским учёным и инженерам. Американские астронавты Н. Армстронг и Э. Олдрин 20 июля 1969 г. впервые осуществили мягкую посадку на поверхность Луны.

Большую роль в изучении околоземного пространства играют орбитальные космические комплексы, позволяющие вести постоянный мониторинг аэро- и гидросферы Земли. В настоящее время на орбитальных станциях разрабатываются технологии изготовления материалов, которые можно получать только в условиях длительной невесомости (например, сверхчистые кристаллы).

Удалённые космические объекты удобно изучать с помощью телескопов-обсерваторий, выведенных на околоземную орбиту. Так, в 1990 г. на орбиту Земли был выведен космический телескоп «Хаббл». В рамках этого международного проекта было получено огромное количество информации об удалённых галактиках, звёздах, туманностях и так называемых экзопланетах, принадлежащих другим звёздным системам.

В ноябре 1998 г. был запущен российский сегмент Международной космической станции (МКС). МКС — совместный проект, целью которого является исследование околоземного пространства и выполнение целого ряда экспериментов в условиях невесомости. В этом проекте участвуют 15 стран.

В августе 2012 г. осуществил мягкую посадку на поверхность Марса американский марсоход «Curiosity», предназначенный для исследования поверхности этой планеты.



Юрий Алексеевич Гагарин
(1934—1968)

Русский лётчик-космонавт, первый человек, совершивший полёт в космос.



Сергей Павлович Королёв
(1907—1966)

Конструктор, учёный, академик. Дважды Герой Социалистического Труда. С его именем связан запуск первого космического спутника и первый полёт человека в космос.

ВОПРОСЫ:

- Что называют реактивным движением?
- Какие примеры реактивного движения вам известны?
- Каковы основные достижения в освоении космоса?

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как решать задачи на закон сохранения импульса, записанный в векторной форме.
- Что такое абсолютно неупругое соударение тел.

При решении задач на изменение импульса необходимо учитывать его векторный характер. Поэтому соответствующее векторное равенство следует записывать в проекциях на оси выбранной системы координат. Довольно часто закон сохранения импульса применяют для решения задач, в которых требуется находить скорости тел. При этом выбор направления осей координат, на которые записывают в проекциях векторные уравнения, диктуется удобством решения задач.

ЗАДАЧА 1 Упругий мячик массой 100 г со скоростью 10 м/с ударяется в потолок и отскакивает вниз с такой же по модулю скоростью. Найдите силу, действующую на потолок при ударе, считая её постоянной. Время соударения принять равным 0,01 с.

Дано:
 $m = 100 \text{ г}$
 $v_0 = 10 \text{ м/с}$
 $v = 10 \text{ м/с}$
 $\Delta t = 0,01 \text{ с}$

СИ
 0,1 кг

Решение:

Проведём координатную ось, направление которой совпадает с направлением движения мяча после удара, т.е. вертикально вниз. Во время удара на мяч действуют две силы: сила тяжести $m\vec{g}$ и сила $\vec{F}$ со стороны потолка.

Обозначим через $\vec{v}_0$ скорость мяча до удара о потолок, а через $\vec{v}$ — его скорость непосредственно после удара. Запишем изменение импульса тела:

$$\Delta \vec{p} = m\vec{v} - m\vec{v}_0 = (\vec{F} + m\vec{g})\Delta t.$$

В проекции на ось y это уравнение можно записать в виде

$$mv - (-mv_0) = (F + mg)\Delta t.$$

Учитывая, что $v = v_0$, получим

$$F = \frac{2mv_0}{\Delta t} - mg,$$

$$F = 200 \text{ Н} - 1 \text{ Н} = 199 \text{ Н}.$$

Согласно третьему закону Ньютона сила, действующая на потолок со стороны мяча, равна:

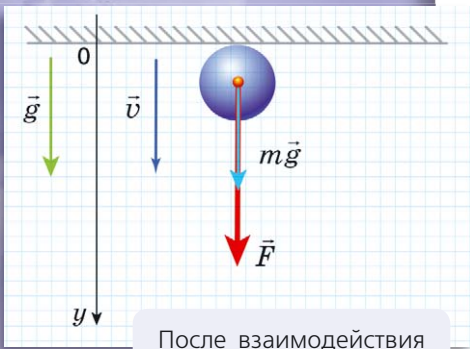
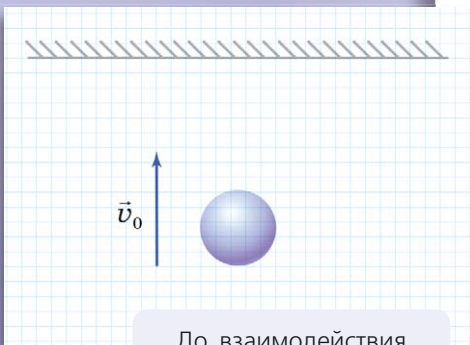
$$\vec{F}_1 = -\vec{F}.$$

Следовательно, $F_1 = 199 \text{ Н}$.

Ответ: $F_1 = 199 \text{ Н}$.

ЗАДАЧА 2 На движущуюся со скоростью 2 м/с тележку массой 500 г с некоторой высоты свободно падает пластилиновый шарик массой 100 г и прилипает к тележке. Найдите скорость тележки с прилипшим пластилином. Силой трения, действующей на тележку, пренебречь.

Если после соударения тела движутся с одинаковой скоростью, то такой удар называют **абсолютно неупругим**, а взаимодействие между телами называют **абсолютно неупругим взаимодействием**.



Дано:

$$m_1 = 500 \text{ г}$$

$$m_2 = 100 \text{ г}$$

$$v_0 = 2 \text{ м/с}$$

$$v = ?$$

СИ

$$0,5 \text{ кг}$$

$$0,1 \text{ кг}$$

Решение:

Поскольку взаимодействие шарика с тележкой является абсолютно неупругим, то после соударения тела будут двигаться далее как единое целое.

Внешними силами, действующими на оба тела системы, являются силы тяжести, а также сила реакции, действующая на тележку со стороны опоры.

В проекции на направление движения тележки должен выполняться закон сохранения импульса, поскольку проекции внешних сил на это направление равны нулю. Проекция начального импульса системы на ось x равна начальному импульсу тележки: $p_{x\text{нач}} = m_1 v_0$.

Проекция конечного импульса на ось x

$$p_{x\text{кон}} = (m_1 + m_2)v.$$

Согласно закону сохранения импульса

$$p_{x\text{нач}} = p_{x\text{кон}}, \text{ или } m_1 v_0 = (m_1 + m_2)v.$$

Отсюда

$$v = \frac{m_1 v_0}{m_1 + m_2},$$

$$v = \frac{0,5 \cdot 2}{0,6} \text{ м/с} = 1,67 \text{ м/с}.$$

Ответ: $v = 1,67 \text{ м/с}$.

ЗАДАЧА 3

Два тела с одинаковыми по модулю импульсами, равными $5 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$, движутся по гладкой горизонтальной поверхности во взаимно перпендикулярных направлениях. В результате неупругого соударения тела соединяются и движутся далее как единое целое. Найдите импульс составного тела.

Дано:

$$p_1 = 5 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$$

$$p_2 = 5 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$$

$$p = ?$$

Решение:

Поскольку трение отсутствует, то суммарный импульс системы должен сохраняться. Запишем суммарный импульс тел до взаимодействия:

$$\vec{p}_{\text{нач}} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2.$$

Согласно закону сохранения импульса

$$\vec{p}_{\text{кон}} = \vec{p}_{\text{нач}}.$$

Следовательно, $\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$.

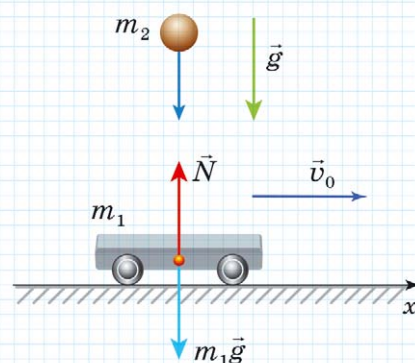
Так как импульсы тел направлены взаимно перпендикулярно, квадрат модуля суммарного импульса можно найти по теореме Пифагора:

$$p^2 = p_1^2 + p_2^2 = 2p_1^2, \text{ так как } p_1 = p_2.$$

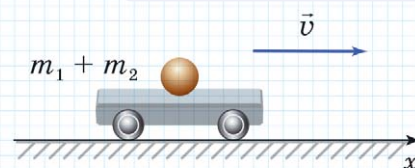
$$\text{Отсюда } p = p_1 \sqrt{2} \approx 7,1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$$

Ответ: $p \approx 7,1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$.

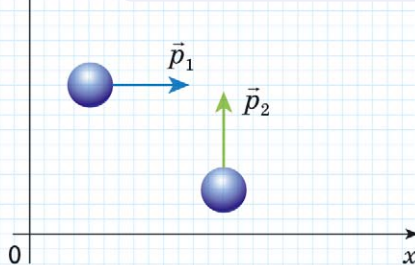
До взаимодействия



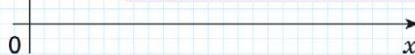
После взаимодействия



До взаимодействия



После взаимодействия



$$E_k + E_{\text{п}} = \text{const}$$

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

$$E_{\text{п}} = mgh$$

$$E_k = \frac{mv^2}{2}$$

h

$\vec{F}_{\text{упр}}$

$\vec{F}_{\text{упр}}$

$\vec{F}_{\text{тяж}}$

Потенциальная энергия
упругой деформации

ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

- Работа постоянной силы равна произведению модулей силы и перемещения на косинус угла между ними.
- Мощностью называют отношение работы к интервалу времени, за который эта работа совершена.
- Энергия — физическая величина, характеризующая способность тела совершать работу. Различают потенциальную и кинетическую энергии.
- Работа силы тяжести не зависит от формы траектории, а зависит только от разности высот в начальном и конечном положениях. Изменение потенциальной энергии также не зависит от формы траектории.
- Теорема об изменении кинетической энергии: изменение кинетической энергии тела (материальной точки) равно работе сил, действующих на это тело.
- Закон сохранения энергии: в замкнутой системе, в которой действуют только силы тяжести и силы упругости, механическая энергия сохраняется.
- Закон сохранения импульса: векторная сумма импульсов тел, составляющих замкнутую систему, остаётся постоянной при любых движениях и взаимодействиях тел этой системы.

$$A_{\text{тяж}} = F_{\text{тяж}} \Delta s$$

$$A_{\text{упр}} = F_{\text{упр}} \Delta s$$

$$N = Fv$$

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \text{const}$$



ПОДРОБНЕЕ...

Липсон Г. Великие эксперименты в физике. / Г. Липсон. — М.: Мир, 1978.

Энциклопедия для детей. Т. 16. Физика. Ч. 1. Биография физики. Путешествие в глубь материи. Механическая картина мира. — М.: Аванта+, 2000.

Энциклопедия для детей. Т. 14. Техника. — М.: Аванта+, 2001.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

- Воздушный шар поднимается вверх. При этом его потенциальная энергия увеличивается. За счёт чего это происходит?
- Пружинный пистолет стреляет шариками известной массы. Как, пользуясь только одной линейкой, определить жёсткость пружины?
- По доске, лежащей на гладкой поверхности, начинает скользить брусочек, и через некоторое время из-за трения его скольжение относительно доски прекращается. Можно ли для нахождения конечной скорости доски и брусочка использовать закон сохранения импульса?

Государственная корпорация
по космической деятельности
<http://gotourl.ru/13732>

Музей космонавтики
<http://gotourl.ru/13733>



АТОМ — ОТ ГИПОТЕЗЫ ДЕМОКРИТА ДО ТАБЛИЦЫ МЕНДЕЛЕЕВА



Творцом идеи атома принято считать древнегреческого философа Демокрита. Самую маленькую частицу вещества, которую нельзя разделить на части, Демокрит назвал «атом», что в переводе означает «неделимый». Более двух с половиной тысяч лет назад Демокрит написал: «Начала Вселенной — атом и пустота, всё же остальное существует лишь во мнении».

Один из древнегреческих философов, Эмпедокл, утверждал, что окружающий нас мир построен из четырёх элементов — земли, воды, воздуха и огня. Учение Эмпедокла развил великий Аристотель. Согласно его учению все тела состоят из одного и того же вещества, но это вещество может обладать разными свойствами: холод, тепло, влажность и сухость. Соединяясь по два, они образуют элементы Эмпедокла. Так, сухое и холодное вещество даёт землю, сухое и горячее — огонь, влажное и холодное — воду. Утверждая, что все вещества могут взаимно превращаться друг в друга, Аристотель категорически отвергал существование атомов. Он говорил: «Природа не терпит пустоты», т.е. считал, что каждое тело можно делить до бесконечности.

Демокрит был уверен в том, что все вещества в природе построены из атомов, а свойства веществ зависят от различных сочетаний атомов. Аристотель же утверждал, что всё сущее состоит из комбинаций элементов Эмпедокла, которые являются носителями определённых качеств, а именно холода, тепла, влажности и сухости. Из-за огромного авторитета Аристотеля его учение стало господствующим и определяло развитие науки почти до XVIII в.

В Средние века учение об элементах возродили алхимики. Считалось очевидным, что одни окружающие нас тела способны превращаться в другие. Горение, обжиг руды, получение сплавов металлов — все эти явления были хорошо известны. История алхимии насчитывает несколько веков: с VIII по XIII в. Несмотря на то что алхимикам не удалось превратить ртуть в золото или найти эликсир жизни, их опыты позволили постепенно накопить большое количество фактов, которые помогли дальнейшему становлению химии как науки.

Стало ясно, что число основных веществ — элементов — существенно больше четырёх. Ртуть, свинец, серу, золото, сурьму нельзя было разложить на более простые составляющие, уже нельзя было говорить, что эти вещества построены из элементов Аристотеля. Напротив, они сами являлись элементами мира.

В 1668 г. в Англии вышла книга Роберта Бойля «Скептический химик, или Сомнения и парадоксы относительно элементов алхимиков», в которой Бойль определил элементы как «некоторые примитивные, или простые, или совершенно несмешанные вещества».



ELEMENTS

Hydrogen	1
Acute	5
Carbon	56
Oxygen	7
Phosphorus	9
Sulphur	18
Magnesia	24
Lime	24
Soda	28
Potash	42
Strontian	46
Barites	60
Iron	56
Zinc	56
Copper	56
Lead	90
Silver	190
Gold	190
Platina	190
Mercury	161

Handwritten notes on a piece of paper, likely a student's work or a scientist's notebook, showing calculations and chemical formulas. The text includes:

Handwritten notes:
 $22 = 90$? = 140
 $36 = 94$ $56 = 142$
 $40 = 96$ $10 = 146$
 $46 = 144$ $94 = 147$
 $40 = 144$ $24 = 148$
 $94 = 146$ (549)
 $46 = 148$ $14 = 149$
 $40 = 146$ $14 = 147$
 $14 = 148$ $14 = 147$
 $46 = 146$ $14 = 147$
 $14 = 148$
 $5 = 142$ $46 = 148$
 $24 = 149$
 $24 = 148$ $14 = 147$
 $24 = 147$ $94 = 147$

5 1/nm

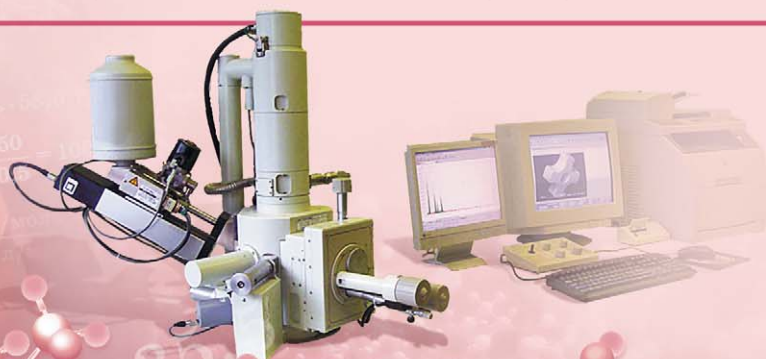
Антуан Лоран Лавуазье, которого считают основателем современной химии, не только целиком принял учение Бойля, но и пошёл дальше: он научился выделять элементы из химических соединений. Он исходил из предположения, которое сейчас может показаться тривиальным, о том, что каждый элемент соединения весит меньше, чем всё соединение в целом. Последовательно применяя этот принцип, он составил первый список почти из 30 элементов.

Следующим шагом явились работы английского физика и химика Джона Дальтона. В 1808 г. вышла его знаменитая книга «Новая система химической философии». Дальтон определил элемент как вещество, состоящее из атомов одного вида. Атомы различных веществ различаются по массе и при всех превращениях веществ остаются неизменными — происходит лишь их перегруппировка. «Мы с таким же успехом можем прибавить новую планету в Солнечную систему, как создать или уничтожить атом водорода».

Венцом в создании современной картины строения вещества является открытие 17 февраля 1869 г. нашим великим соотечественником Дмитрием Ивановичем Менделеевым Периодической системы элементов, или, как принято говорить, таблицы Менделеева. Менделеев не только систематизировал известные к тому времени элементы, но и на основании предложенной систематики нашёл ошибки в измерении атомных масс элементов и предсказал пять новых элементов. Периодическая система элементов поставила точку в длительном споре между представлениями Демокрита и Аристотеля о природе элементов.

За прошедшие со времён этого открытия годы наука шагнула далеко вперёд, и сегодня мы живём в век сложной электроники и нанотехнологий. Физики научились строить сложные физические установки для изучения свойств материи. Благодаря этим исследованиям было установлено, что в природе существует всего 92 различных атома, ещё около 25 атомов новых элементов учёные искусственно создали в своих лабораториях. В настоящее время существование атомов не только доказано экспериментально, но и сконструированы устройства, позволяющие увидеть атом и дающие возможность манипулировать отдельными атомами.

В теме «Молекулярная физика» вы изучите физические явления и законы, которые позволят вам ответить на многие вопросы: с какой скоростью движутся частицы различных веществ и от чего эта скорость зависит? Чем обусловлены различия свойств твёрдых тел, жидкостей и газов? Как связаны свойства тел, которые мы можем воспринять нашими органами чувств, с характеристиками отдельных атомов и молекул, составляющих тело? И наконец, вы сможете дать ответ на многовековой вопрос, заданный Демокритом: что получится, если очень острым ножом разрезать яблоко пополам, потом половинку разрезать ещё раз пополам и т.д.? Сможем ли мы резать яблоко до бесконечности, или существует предел его деления, которым является некоторая мельчайшая частица? Поскольку размеры атомов определены с высокой точностью, то можно действительно назвать число разрезов яблока из задачи Демокрита, сопоставив тем самым размеры яблока и атома.



Глава 5

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО- КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

- ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ
- ОСНОВНАЯ ЦЕЛЬ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ
- КОЛИЧЕСТВО ВЕЩЕСТВА. МОЛЯРНАЯ МАССА
- СТРОЕНИЕ ГАЗООБРАЗНЫХ, ЖИДКИХ И ТВЁРДЫХ ТЕЛ
- ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ. ДАВЛЕНИЕ ГАЗА. СРЕДНЯЯ СКОРОСТЬ ДВИЖЕНИЯ МОЛЕКУЛ ГАЗА
- ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ
- ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ МОЛЕКУЛ. ОПЫТ ШТЕРНА
- ТЕМПЕРАТУРА. ТЕПЛОВОЕ РАВНОВЕСИЕ. ТЕРМОМЕТРЫ
- ИЗОПРОЦЕССЫ. ЗАКОН ГЕЙ-ЛЮССАКА. АБСОЛЮТНАЯ ТЕМПЕРАТУРА
- ЗАКОН БОЙЛЯ–МАРИОТТА. ЗАКОН ШАРЛЯ
- УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА
- ТЕМПЕРАТУРА И СРЕДНЯЯ КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ МОЛЕКУЛ
- РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

РАЗДЕЛ II



МОЛЕКУЛЯРНАЯ
ФИЗИКА

КОРОТКО О ГЛАВНОМ...

Все тела состоят из атомов — маленьких телец, которые находятся в непрерывном движении, притягиваются на небольшом расстоянии, но отталкиваются, если одно из них плотнее прижать к другому. В одной этой фразе содержится невероятное количество информации о мире, стоит лишь приложить к ней немного воображения и чуть соображения.

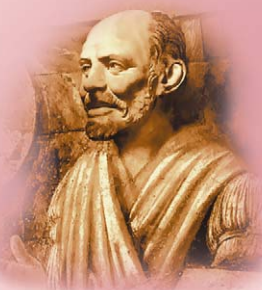
Р. Фейнман

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Три положения молекулярно-кинетической теории.
- Что такое броуновское движение.
- Что такое диффузия.

ВСПОМНИТЕ:

- Что вы знаете о строении вещества?
- Что вы знаете об агрегатных состояниях вещества?

**Демокрит**

(V в. до н.э.)

Древнегреческий философ-материалист, один из первых сторонников учения о том, что материя состоит из чрезвычайно малых частиц.

**Дмитрий Иванович Менделеев**

(1834—1907)

Великий русский химик, открывший периодический закон химических элементов, разносторонний учёный, педагог и общественный деятель.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Тот факт, что все тела состоят из атомов и молекул, хорошо известен. Наша задача — сделать следующий шаг: научиться качественно, а в некоторых случаях и количественно описывать широкий круг физических явлений на основе атомно-молекулярных представлений о строении вещества.

МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ

Раздел физики, в котором изучаются физические свойства вещества на основе представления о том, что оно состоит из атомов и молекул, называют **молекулярной физикой**. Ещё в Древней Греции около двух с половиной тысяч лет назад Демокритом была выдвинута гипотеза о том, что вещество состоит из мельчайших частичек (атомов) и пустот между ними. Но лишь в XVIII в. эта гипотеза начала превращаться в последовательно развиваемую научную теорию — **молекулярно-кинетическую теорию (МКТ)**, которая стала основой молекулярной физики.

ТРИ ПОЛОЖЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

В основе молекулярно-кинетической теории лежат следующие положения:

- Все вещества состоят из мельчайших частиц — атомов и молекул.
- Частицы вещества находятся в непрерывном хаотичном движении.
- Частицы вещества взаимодействуют друг с другом.

Рассмотрим экспериментальное обоснование каждого из этих положений.

АТОМЫ И МОЛЕКУЛЫ

Атомы всех химических элементов систематизированы на основе периодического закона, открытого Д. И. Менделеевым. Всего в таблице Менделеева 118 элементов. 92 из них существует в природе, остальные созданы в лабораториях учёных.

Размеры атомов очень малы. Часто приводят такое сравнение: если увеличить яблоко до размеров земного шара, то размер атома увеличится до размера яблока. Однако современные электронные микроскопы позволили не только увидеть атомную структуру вещества, но и перемещать отдельные атомы.

Молекула — это мельчайшая частица вещества, обладающая всеми его химическими свойствами и способная к самостоятельному существованию. Такой мельчайшей частицей вещества может быть и отдельный атом (например, пары металлов), и соединение нескольких одинаковых атомов (например, молекулы газов кислорода O_2 и азота N_2), и сложные соединения атомов различных элементов (например, вода H_2O).

Исходя из повседневного опыта, вещества нам представляются сплошными, а не состоящими из отдельных частиц. Это связано с очень маленькими размерами молекул и промежутков между ними.



Одним из основателей молекулярно-кинетической теории вещества является великий русский учёный М.В. Ломоносов. В своих трудах «Элементы математической химии» и «О нечувствительных физических частицах» Ломоносов изложил основы атомно-молекулярной теории строения вещества и подкрепил их опытными фактами. Он писал: «Физические тела разделяются на мельчайшие части, в отдельности избегающие чувств зрения, так что тела состоят из нечувствительных частичек».

Один из самых известных опытов по определению размеров молекул провёл английский учёный Рэлей. Результаты его измерений для молекулы оливкового масла дали величину 0,0000000016 м.

Когда говорят о размерах молекул или атомов, то в качестве единицы длины используют не метр, а **ангстрем** (обозначается Å), равный 10^{-10} м, или **нанометр**, равный 10^{-9} м. Например, размер молекулы воды равен примерно 3 Å, а размер атома золота равен примерно 1 Å.

ЗАКОН ПОСТОЯННЫХ ОТНОШЕНИЙ В 1808 г. Д. Дальтон опубликовал труд «Новая система химической философии». В этой работе Дальтон определил химический элемент как вещество, состоящее из атомов одного вида. Он предположил, что атомы различных элементов отличаются друг от друга по массе, но при различных превращениях вещества атомы остаются неизменными. Смешение и объединение неизменных атомов в различных пропорциях приводят к образованию в природе различных веществ.

Закон постоянных отношений состоит в том, что при образовании любого количества какого-либо химического соединения масса соединяющихся веществ всегда находится в совершенно определённом соотношении. Это означает, например, что молекула воды всегда состоит из двух атомов водорода и одного атома кислорода. При этом отношение масс атомов водорода и кислорода, входящих в молекулу воды, всегда одинаково и не зависит ни от количества воды, ни от того, откуда мы взяли эту воду.

ДВИЖЕНИЕ МОЛЕКУЛ В 1827 г. английский ботаник Р. Броун, занимаясь изучением поведения цветочной пыльцы в жидкости под микроскопом, неожиданно обнаружил очень необычное явление: отдельные споры хаотично двигались без видимых на то причин. Броун наблюдал это явление несколько дней, однако так и не смог дождаться его прекращения. Сначала Броун решил, что в поле микроскопа попали некие живые суще-



Михаил Васильевич Ломоносов
(1711—1765)

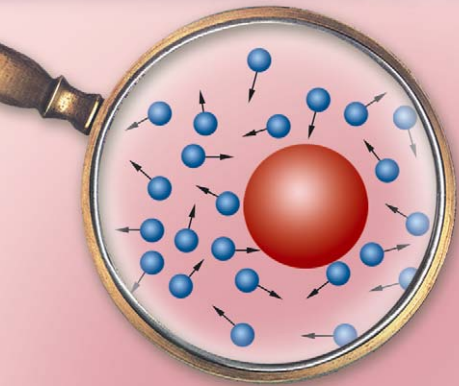
Учёный-естествоиспытатель, первый российский академик Петербургской академии наук, реформатор русского языка, поэт, художник.

Мир молекул и атомов очень разнообразен. Если размеры самых маленьких молекул достигают порядка 10^{-10} м, то крупные молекулы могут достигать «больших» размеров — микрометров (10^{-6} м). Примером таких молекул являются белки — молекулы живой природы, состоящие из огромного числа атомов.



Джон Дальтон
(1766—1844)

Английский физик и химик, оказавший большое влияние на развитие атомистической теории. Ввёл в науку понятие «атомный вес» и первым определил атомные веса (массы) ряда элементов.



Роберт Броун
(1773—1858)

Английский ботаник. Основные работы посвящены морфологии и систематике растений.



ства, однако так же вели себя и частички мёртвых растений, засушенных задолго до этого в гербариях. Броун провёл опыты с мельчайшими частичками угля, сажи, стекла и различных минералов. Он наблюдал беспорядочное движение всех частичек в воде. Описав характер движения частиц, Броун вынужден был признать, что он не знает объяснения этого процесса.

Строгое объяснение броуновского движения появилось только в начале XX в. в работах М. Смолуховского и А. Эйнштейна. Эйнштейн объяснил, что взвешенная в воде спора подвергается постоянной бомбардировке со стороны молекул воды. Удары молекул в частицу с разных сторон и приводят к скачкообразным перемещениям, которые Броун наблюдал в микроскоп. А поскольку молекулы в микроскоп не видны, то движение спор казалось Броуну беспричинным. Впоследствии это явление назвали **броуновским движением**.

Если сосуд с водой, содержащей взвесь мельчайших твёрдых частиц, нагреть, то скорость броуновского движения частичек по мере нагревания воды заметно увеличивается. Причиной этого является увеличение средней скорости движения молекул воды. Именно поэтому хаотичное движение частиц, из которых состоит тела, называют **тепловым движением**. В тепловом движении участвуют все частицы, составляющие вещество, — молекулы или атомы, *независимо* от того, в каком агрегатном состоянии находится это вещество. Изменение характера теплового движения молекул вещества может приводить к изменению его свойств. Например, при нагревании лёд начинает превращаться в воду.

ДИФфуЗИЯ Явление, при котором происходит взаимное проникновение молекул одного вещества между молекулами другого, называют **диффузией**. Причиной диффузии является непрерывное и беспорядочное движение частиц вещества. Наиболее быстро диффузия происходит в газах, медленнее — в жидкостях, а в твёрдых телах — совсем медленно, годами.

Диффузия является ещё одним проявлением движения молекул. Процесс диффузии ускоряется с повышением температуры. Это происходит потому, что с повышением температуры увеличивается скорость движения молекул. Чем выше температура вещества, тем быстрее происходит диффузия.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЧАСТИЦ ВЕЩЕСТВА ДРУГ С ДРУГОМ Все молекулы находятся в состоянии непрерывного движения. Однако одни тела сохраняют свою форму и объём, а другие нет. Почему это происходит?

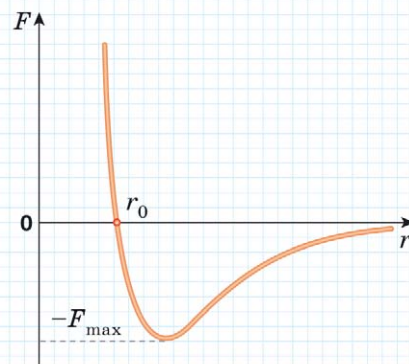
Молекулы вещества могут притягиваться друг к другу и отталкиваться друг от друга. Что действует сильнее — притяжение или отталкивание, напрямую зависит от расстояния между молекулами.

На расстояниях, сравнимых с размерами самих молекул (атомов), заметнее проявляется притяжение, а при дальнейшем сближении — отталкивание. Если молекулы находятся друг от друга на расстояниях, превышающих их размеры в несколько раз, то силы взаимодействия между ними становятся очень малы и практически не проявляются. Различные агрегатные состояния вещества определяются взаимным расположением составляющих вещество молекул, а также характером их движения и взаимодействия.

В газах при атмосферном давлении расстояния между молекулами намного больше размеров самих молекул, поэтому притяжение между молекулами газа мало. При обычных температурах средняя кинетическая энергия молекул газа вполне достаточна для совершения работы по преодолению сил их взаимного притяжения, поэтому молекулы газа разлетаются, если газ не сдерживают стенки сосуда.

Плотности жидкостей и твёрдых тел во много раз больше плотностей газов, следовательно, их молекулы расположены гораздо ближе. На таких расстояниях силы межмолекулярного взаимодействия могут приводить и к взаимному притяжению, и к взаимному отталкиванию. Эти силы не позволяют атомам и молекулам отойти на большее расстояние друг от друга или приблизиться ещё больше. Существует определённое расстояние между молекулами, вблизи которого силы притяжения уравновешивают силы отталкивания, и равнодействующая этих сил равна нулю. В этом случае говорят, что система молекул находится в состоянии устойчивого равновесия.

ПРИРОДА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОЛЕКУЛ Молекула представляет собой систему, состоящую из отдельных заряженных частиц — электронов и атомных ядер. Хотя в целом молекулы электрически нейтральны, взаимодействие между ними имеет электрическую природу. На малых расстояниях между электронами и атомными ядрами соседних молекул действуют электрические силы. Силы между электрически нейтральными молекулами являются короткодействующими, поэтому они практически не сказываются на расстояниях, существенно превышающих размеры молекул. На расстояниях, составляющих около 2–3 диаметров молекул, действуют силы притяжения. При сближении молекул начинают расти силы отталкивания, которые становятся равными силам притяжения на расстояниях, сопоставимых с размерами молекул. При дальнейшем сближении силы отталкивания начинают стремительно расти. Почти две тысячи лет сторонники атомистической теории считали, что атомы в веществе держатся вместе за счёт какой-то сложной конструкции, похожей на крючки или специальные зазоры. Великий английский физик И. Ньютон впервые предположил, что, возможно, существуют силы притяжения, действующие на столь малых расстояниях, что их до сих пор не могут обнаружить.



На графике показана примерная зависимость силы взаимодействия F от расстояния r между молекулами. Положительное значение силы соответствует отталкиванию молекул, отрицательное — притяжению молекул. Расстояние r_0 отвечает устойчивому равновесному (ненапряжённому) состоянию тела. В этом состоянии $F = 0$. При отклонении r от значения r_0 возникают силы, стремящиеся восстановить равновесное состояние. Из графика видно, что при смещении от значения r_0 в сторону больших r между молекулами возникает сила притяжения, сначала резко возрастающая по модулю до значения $F_{\max}$, а затем постепенно убывающая по мере увеличения r . При смещении от значения r_0 в сторону меньших r возникает сила отталкивания, очень быстро возрастающая при уменьшении r .

ЗАДАНИЯ:

- Сформулируйте три положения молекулярно-кинетической теории.
- Приведите примеры экспериментального подтверждения положений молекулярно-кинетической теории.

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое макроскопические и микроскопические параметры.
- Какова основная цель МКТ.

ВСПОМНИТЕ:

- Какие вопросы рассматриваются в разделе физики «Молекулярная физика»?
- Три положения молекулярно-кинетической теории.



Ричард Филипс Фейнман
(1918—1988)

Выдающийся американский физик. Лауреат самой престижной в мире Нобелевской премии. Автор известного учебника по физике.

Лёд (при 0°C)
Плотность 900 кг/м³

Вода (при 4°C)
Плотность 1000 кг/м³

Водяной пар (при 100°C)
Плотность 0,59 кг/м³



...Каждая молекула идёт своим собственным путём, несмотря на непрерывное взаимное влияние... каждая молекула существует некоторым образом как самостоятельный действующий индивидуум.

Л. Больцман

ОСНОВНАЯ ЦЕЛЬ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Молекулярно-кинетическая теория описывает свойства веществ на основе представлений о том, что все они состоят из отдельных частиц, беспорядочно движущихся и взаимодействующих друг с другом.

МАКРОСКОПИЧЕСКИЕ И МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ ТЕЛА

Окружающие нас тела состоят из огромного числа молекул. Такие тела называют **макроскопическими**. Лист бумаги, кубик льда, вода в стакане, воздух в комнате — примеры макроскопических тел.

Атомы и молекулы, из которых состоят тела, — примеры **микроскопических** тел.

Для того чтобы описать свойства физических тел, можно использовать макроскопический или микроскопический подход.

Макроскопический подход предполагает описание физических тел через величины, в той или иной степени воспринимаемые нашими органами чувств. К таким величинам относятся, например, масса тела, его объём, скорость движения, температура.

Микроскопический подход предполагает описание свойств физических тел и физических явлений, происходящих с телами, рассматривая движение и взаимодействие составляющих тело атомов и молекул.

Изучая механику Ньютона, мы изучали механическое движение макроскопических тел. В механике мы не только не интересовались внутренним строением тела, но даже в ряде случаев заменяли реальное физическое тело абстрактной материальной точкой.

Микроскопический подход предполагает описание свойств тела через свойства и характеристики движения молекул, из которых это тело состоит. Такое описание может быть очень сложным.



Говоря о переходе от макроскопической точки зрения к микроскопической, Р.Фейнман писал: «От законов Ньютона до свойств вещества очень много шагов, и каждый шаг очень труден». Причина этого заключается в том, что, во-первых, при описании системы важно не проследить движение каждого отдельного атома, а понять, как из поведения каждого атома складывается поведение всей системы в целом. А для этого необходимо глубокое знание раздела математики «Теория вероятностей». Во-вторых, что наиболее важно, поведение атомов не подчиняется законам классической механики (механики Ньютона). Поведение атомов описывается законами квантовой механики.

МАКРОСКОПИЧЕСКИЕ И МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

Величины, характеризующие состояние макроскопических тел, называют **макроскопическими параметрами**. Примерами макроскопических параметров могут быть масса тела, его объём и температура, давление, оказываемое телом на опору, скорость движения тела и его ускорение.

Величины, характеризующие свойства отдельных молекул или атомов, называются **микроскопическими параметрами**. Примерами микроскопических параметров являются масса молекулы, средняя скорость движения и средняя кинетическая энергия молекул.

Важно отметить, что не все макроскопические параметры можно применять к микроскопическим телам. Например, бессмысленно говорить о давлении или температуре одной молекулы.

Учитывая сложность макросистем, часто начинают их изучение с наиболее простых объектов — систем, состояние которых не меняется со временем. Состояние макроскопической системы, в котором она может находиться неопределённо долгое время, называют равновесным. Равновесное состояние системы в целом может быть описано при помощи макроскопических параметров, к числу которых относят давление, объём и т.д.



Одним из макроскопических параметров является плотность вещества — физическая величина, равная отношению массы тела к его объёму:

$$\text{плотность} = \frac{\text{масса}}{\text{объём}}, \quad \rho = \frac{m}{V}.$$

Масса тела и его объём также являются макроскопическими параметрами.

Так как все вещества состоят из атомов, то масса любого тела должна зависеть от микроскопического параметра — массы атомов, а также от того, насколько плотно «упакованы» атомы и молекулы в веществе. Плотность вещества можно определить, умножив массу одной молекулы на количество

молекул, содержащихся в 1 м^3 . Современные приборы позволяют достаточно точно определить массу одной молекулы. Используя это значение, а также зная массу единицы объёма вещества, можно определить количество молекул в единице объёма. Таким способом установлено, что в 1 м^3 чистой воды содержится $3,34 \cdot 10^{28}$ молекул.

Молекулы вещества находятся на разных расстояниях друг от друга в газообразном, жидком и твёрдом агрегатных состояниях. Их количество в единице объёма сильно различается, следовательно, будет различаться и плотность.

Вот почему, например, плотность вещества в жидком состоянии превышает его плотность в газообразном состоянии.

ОСНОВНАЯ ЦЕЛЬ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Одним из фундаментальных открытий в физике явилось то, что теплоту удалось объяснить с помощью физических величин, используемых в механике.

Например, чем интенсивнее движение молекул, тем выше их средняя кинетическая энергия и тем выше, следовательно, температура тела.

Основной целью молекулярно-кинетической теории является объяснение свойств макроскопических тел и тепловых процессов, происходящих в них, на основе представлений о движении и взаимодействии молекул. Другими словами, основная цель молекулярно-кинетической теории — установление связи между макроскопическими и микроскопическими параметрами системы.



ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

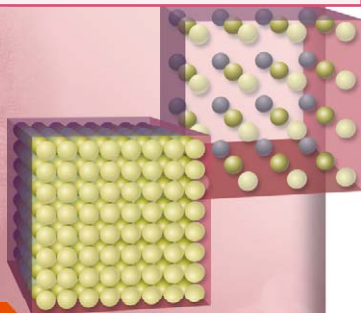
- Что такое макроскопические и микроскопические параметры?
- Приведите примеры макроскопических и микроскопических параметров.
- Какова основная цель молекулярно-кинетической теории?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое количество вещества и постоянная Авогадро.
- Что такое молярная масса.

ВСПОМНИТЕ:

- Что вы знаете из курса химии за 8 класс об относительной атомной массе?
- Что вы знаете из курса химии за 8 класс о молярной массе?



Атомная единица массы (а.е.м.) равна $1/12$ части массы атома углерода:

$$1 \text{ а.е.м.} = \frac{1}{12} m_{^{12}_6\text{C}} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Масса любого атома или молекулы может быть выражена как в атомных единицах массы, так и в килограммах:

$$m_a = M_r \cdot \text{а.е.м.} = M_r \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг,}$$

где M_r — относительная атомная масса.

Относительной молекулярной (атомной) массой M_r называют отношение массы молекулы (или атома) m_0 данного вещества к $1/12$ массы атома углерода $m_{\text{ос}}$.

КОЛИЧЕСТВО ВЕЩЕСТВА. МОЛЯРНАЯ МАССА

И. Ньютон писал, что «количество материи (масса) есть мера таковой, устанавливаемая пропорционально плотности и объёму её», так как он считал, что все вещества состоят из совершенно одинаковых частиц (т.е. ещё не было известно, что атомы различных веществ отличаются друг от друга). Но в различных веществах эти частицы по-разному движутся и, следовательно, по-разному «упакованы» в единице объёма. Сегодня хорошо известно, что частицы, из которых состоит вещество, — атомы или молекулы — имеют различные массы. Поэтому для решения многих физических задач необходимо знать массы атомов (молекул), из которых состоит тело, а также уметь определять их количество в этом теле.

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ МОЛЕКУЛЯРНАЯ (АТОМНАЯ) МАССА

Так как массы отдельных атомов и молекул очень малы, выражать их в килограммах или граммах нецелесообразно. Например, масса атома водорода составляет $1,67 \cdot 10^{-27}$ кг, а масса атома углерода — $19,9 \cdot 10^{-27}$ кг. Гораздо удобнее выражать массы атомов в относительных единицах, т.е. определять, во сколько раз масса данного атома больше массы некоторого эталона (например, самого лёгкого атома — атома водорода).

С 1961 г. в качестве единицы атомной массы принята атомная единица массы (а.е.м.), равная $1/12$ части массы атома углерода. Так как в ядре атома углерода $^{12}_6\text{C}$ содержится 12 нуклонов — 6 протонов и 6 нейтронов, то атомная единица массы равна средней массе нуклона в атоме углерода $^{12}_6\text{C}$.

Относительной молекулярной (атомной) массой M_r называют величину, показывающую, во сколько раз масса данной молекулы (или атома) m_0 больше $1/12$ массы атома углерода $m_{\text{ос}}$:

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{\text{ос}}}$$

Относительные атомные массы всех химических элементов точно измерены, и их можно найти, например, в таблице Д.И. Менделеева.

Для того чтобы вычислить относительную молекулярную массу вещества, необходимо сложить относительные атомные массы элементов, входящих в состав молекулы.

Например, относительная молекулярная масса водорода H_2 равна $1 \cdot 2 = 2$, кислорода O_2 равна $16 \cdot 2 = 32$, а относительная молекулярная масса воды H_2O равна $1 \cdot 2 + 16 = 18$.

Относительная молекулярная масса вещества почти совпадает с числом нуклонов A в его ядре:

$$M_r \approx A.$$

КОЛИЧЕСТВО ВЕЩЕСТВА. ЕДИНИЦА КОЛИЧЕСТВА ВЕЩЕСТВА

Когда говорят о количестве вещества, то имеют в виду количество атомов или молекул, содержащихся в физическом теле. Естественным казалось бы взять за единицу количества вещества одну частицу, но тогда с учётом очень маленьких размеров атомов и молекул пришлось бы работать с числами огромных порядков.

Единицей количества вещества в СИ является *моль* — такое количество частиц, которое равно количеству атомов углерода, содержащихся в 0,012 кг (12 г) изотопа углерода с атомной массой 12. Количество вещества, выраженное в молях, обозначают буквой « ν ».

ПОСТОЯННАЯ АВОГАДРО Согласно определению моль любого вещества содержит одно и то же количество частиц этого вещества. Это число называют **постоянной Авогадро** и обозначают N_A . Измерения показали, что $N_A \approx 6,02 \cdot 10^{23}$ 1/моль.

Если, например, количество вещества $\nu = 3$ моль, то число молекул в таком теле

$$N = \nu \cdot N_A = 3 \cdot 6,02 \cdot 10^{23} = 18 \cdot 10^{23} = 1,8 \cdot 10^{24}.$$

Количество вещества равно отношению числа молекул, содержащихся в нём, к постоянной Авогадро:

$$\nu = \frac{N}{N_A}. \quad (1)$$

МОЛЯРНАЯ МАССА Если количество разных веществ составляет 1 моль, то количество молекул в них одно и то же. При этом масса 1 моль различных веществ различна, так как массы молекул этих веществ не равны.

Молярной массой M вещества называют массу вещества, взятого в количестве один моль.

Из определения молярной массы следует, что если масса молекулы вещества m_0 , то

$$M = m_0 N_A. \quad (2)$$

Если необходимо узнать массу тела, то надо умножить массу одной молекулы вещества, из которого состоит тело, на число молекул в этом теле:

$$m = m_0 N. \quad (3)$$

Тогда, для того чтобы найти количество вещества в произвольном теле, надо в выражение (1) подставить выражение для N из уравнения (3) и выражение для N_A из уравнения (2):

$$\nu = \frac{N}{N_A} = \frac{m \cdot m_0}{m_0 \cdot M} = \frac{m}{M}.$$

Таким образом, *количество вещества равно отношению массы вещества к его молярной массе:*

$$\nu = \frac{m}{M}. \quad (4)$$

Учитывая уравнения (1)–(4), число молекул любого количества вещества массой m и молярной массой M можно найти так:

$$N = \nu N_A = N_A \frac{m}{M}. \quad (5)$$

1 моль — это количество вещества, в котором содержится столько молекул или атомов, сколько атомов содержится в углероде массой 0,012 кг (12 г).



Амедео Авогадро
(1776—1856)

Итальянский физик и химик, установивший, что многие свойства газов определяются количеством молекул.

Если обозначить величины: молярная масса — M , масса молекулы вещества — m_0 , количество вещества — ν и постоянная Авогадро — N_A , то молярную массу рассчитывают по формуле

$$M = m_0 N_A,$$

а количество вещества —

$$\nu = \frac{m}{M}.$$

ВОПРОСЫ:

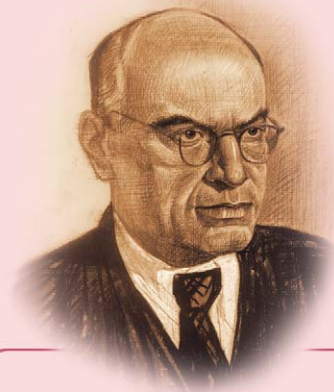
- Что такое количество вещества?
- Какой физический смысл имеет постоянная Авогадро?
- Что такое молярная масса?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Чем различаются макроскопические и микроскопические параметры газообразных, жидких и твёрдых тел.
- Как делать количественные оценки в молекулярной физике.

ВСПОМНИТЕ:

- Агрегатные состояния вещества.
- Основные положения МКТ.



Яков Ильич Френкель
(1894—1952)

Выдающийся советский физик.

С именем Я. И. Френкеля связаны выдающиеся открытия в области квантовой механики, молекулярной и ядерной физики. Им был впервые установлен характер молекулярного движения в жидкостях. Френкель показал, что жидкости гораздо ближе по своим свойствам к твёрдым телам, чем к газам, в противоположность тому, что считалось истиной со времён Аристотеля.

СТРОЕНИЕ ГАЗООБРАЗНЫХ, ЖИДКИХ И ТВЁРДЫХ ТЕЛ

Различные агрегатные состояния вещества различаются как с макроскопической, так и с микроскопической точки зрения. МКТ позволяет понять, почему вещество может находиться в твёрдом, жидком и газообразном состоянии и как осуществляется переход от одного состояния к другому.

МАКРОСКОПИЧЕСКИЕ И МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РАЗЛИЧНЫХ АГРЕГАТНЫХ СОСТОЯНИЙ ВЕЩЕСТВА

Форма и объём тела являются макроскопическими параметрами. Твёрдое тело сохраняет свою форму и объём, и для их изменения необходимо приложить значительную силу. Жидкости не имеют определённой формы, они принимают форму сосуда, в котором находятся. При этом объём жидкости, как и объём твёрдого тела, очень трудно изменить. Газы не обладают ни определённой формой, ни объёмом. Они полностью заполняют сосуд, в котором находятся.

С микроскопической точки зрения то или иное агрегатное состояние определяется взаимным расположением составляющих вещество молекул, а также характером их движения и взаимодействия.

В газах при атмосферном давлении расстояния между молекулами намного больше размеров самих молекул, поэтому притяжение между молекулами газа мало. При обычных температурах скорости движения молекул газа достаточно велики, и их средней кинетической энергии вполне достаточно для совершения работы по преодолению сил их взаимного притяжения, поэтому молекулы газа разлетаются, если газ не сдерживают стенки сосуда.

Плотности жидкостей и твёрдых тел во много раз больше плотностей газов, а их молекулы расположены гораздо ближе друг к другу. В этом случае силы взаимного притяжения молекул намного больше, и средней кинетической энергии молекул уже недостаточно для того, чтобы совершить работу по преодолению сил межмолекулярного притяжения. Это является причиной того, что молекулы в жидкостях и особенно в твёрдых телах не могут далеко удаляться друг от друга. Поэтому атомы и молекулы твёрдого тела колеблются около своих положений в кристаллической решётке. В жидкости скорости движения молекул выше, чем в твёрдых телах, поэтому уже нельзя говорить об их «фиксированном» положении: молекулы жидкости могут осуществлять «перескоки» относительно друг друга.

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ОЦЕНКИ Современной науке известны размеры атомов и молекул. Для определения этих размеров были выполнены сложные расчёты и поставлены специальные эксперименты. Приведём некоторые при-

меры расчётов для газов, жидкостей и твёрдых веществ. Известно, что в 1 см^3 любого газа при нормальных условиях (0°C и 760 мм рт. ст.) содержится около $2,7 \cdot 10^{19}$ молекул. Для того чтобы узнать, какой объём приходится на одну молекулу газа, необходимо поделить объём газа на число содержащихся в нём молекул:

$$V_0 = \frac{1\text{ см}^3}{2,7 \cdot 10^{19}} = 0,37 \cdot 10^{-19}\text{ см}^3.$$

Можно сказать, что на каждую молекулу приходится объём $V_0 = 0,4 \cdot 10^{-19}\text{ см}^3$, что соответствует объёму кубика со стороной примерно $0,3 \cdot 10^{-6}\text{ см} = 3 \cdot 10^{-7}\text{ см}$. Из таблицы видно, что размеры молекул азота и кислорода, из которых состоит воздух, на порядок меньше, т.е. средний объём газа, на который приходится одна молекула, в 1000 раз больше объёма самой молекулы.

Теперь оценим, насколько плотно «упакованы» молекулы воды. Молярная масса воды $M = 18\text{ г/моль}$, плотность воды $\rho = 1\text{ г/см}^3$. Объём одного моля воды $V_{\text{моль}} = M/\rho$. Поскольку один моль воды содержит количество молекул, равное числу Авогадро $N_A \approx 6,02 \cdot 10^{23}$, то объём, приходящийся на одну молекулу воды, составляет

$$V_0 = \frac{V_{\text{моль}}}{N_A} = \frac{M}{\rho N_A} = \frac{18}{1 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}} \approx 3 \cdot 10^{-23}\text{ см}^3.$$

В этом случае на каждую молекулу воды приходится объём $V_0 = 3 \cdot 10^{-23}\text{ см}^3$, что соответствует объёму кубика со стороной примерно $3,1 \cdot 10^{-8}\text{ см}$. Это свидетельствует о том, что в жидкости молекулы «упакованы» достаточно плотно.

ЗАДАЧА ФЕЙНМАНА Р.Фейнман предложил своим студентам очень поучительную задачу: «В один из давних дней палеозойской эры капля послеполюденного ливня упала на мягкую ровную землю и оставила на ней отпечаток. Шло время, на этот отпечаток при раскопках наткнулся страдающий от жары и жажды студент-геолог. Осушая свою фляжку, он от нечего делать прикидывает, сколько молекул из той древней капли было в воде, которую он только что выпил». Попробуем оценить это число.

Пусть объём древней капли 1 см^3 , т.е. капля содержала около $N \approx 3 \cdot 10^{22}$ молекул. Естественно предположить, что за прошедшее с тех пор время молекулы той капли равномерно распределились по всей имеющейся на Земле воде. Учёные считают, что объём всей воды на земном шаре составляет примерно $V \approx 1,45 \cdot 10^{24}\text{ см}^3$. Предположим, что объём воды, выпитой студентом, составляет $v \approx 150\text{ см}^3$. Тогда студент-геолог выпил

$$n = \frac{v}{V} N = \frac{150}{1,45 \cdot 10^{24}} 3 \cdot 10^{22} \approx 3.$$

Полученный результат ошеломляет: в стакане воды содержится несколько молекул из той древней капли!

РАЗМЕРЫ НЕКОТОРЫХ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ

Азот N_2 $3,2 \cdot 10^{-8}\text{ см}$

Кислород O_2 $3 \cdot 10^{-8}\text{ см}$

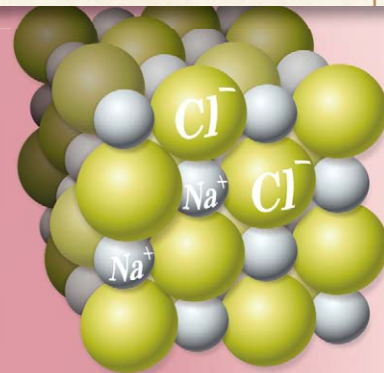
Вода H_2O $3 \cdot 10^{-8}\text{ см}$

Натрий Na $1,9 \cdot 10^{-8}\text{ см}$

Хлор Cl $0,8 \cdot 10^{-8}\text{ см}$

Углерод C $0,67 \cdot 10^{-8}\text{ см}$

Расстояние между ионами Na^+ и Cl^- в кристаллической решётке поваренной соли составляет примерно $2,8 \cdot 10^{-8}\text{ см}$, и это также свидетельствует о том, что расстояние между узлами кристаллической решётки и размеры атомов имеют один и тот же порядок величины.



ВОПРОСЫ:

- Чем объясняются различия между газообразными, жидкими и твёрдыми телами?
- Как соотносятся средний объём, занимаемый молекулой, и размер самой молекулы в газах и жидкостях?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое идеальный газ.
- Как найти среднее значение квадрата скорости движения молекул газа.

ВСПОМНИТЕ:

- Чем характеризуется газообразное состояние вещества с микроскопической и макроскопической точек зрения?
- Что такое материальная точка?
- Чему равна кинетическая энергия тела?

Если бы наши уши были намного чувствительнее, чем они есть на самом деле, мы бы всё время слышали страшный шум... Дело в том, что барабанные перепонки наших ушей соприкасаются с воздухом, а воздух состоит из великого множества беспорядочно движущихся молекул, которые, ударяясь о барабанные перепонки, создают такой шум... Беспорядочные удары молекул должны были бы продавить барабанную перепонку, но её непрестанно бомбардируют и с внутренней стороны, и в результате полная сила, действующая на перепонку, оказывается равной нулю.

Р. Фейнман

ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ. ДАВЛЕНИЕ ГАЗА. СРЕДНЯЯ СКОРОСТЬ ДВИЖЕНИЯ МОЛЕКУЛ ГАЗА

Для изучения того или иного физического явления часто рассматривают его упрощённую схему — модель, для того чтобы сконцентрировать внимание на главных особенностях, характеризующих данное явление, а также не рассматривать факторы, которыми в данной ситуации можно пренебречь. Например, при изучении колебаний мы использовали модель — математический маятник.

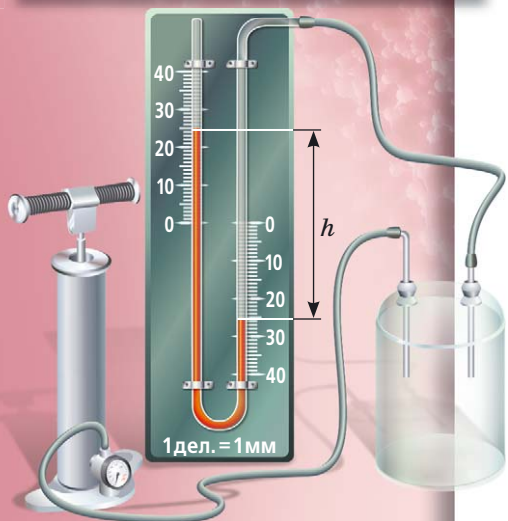
ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ — УПРОЩЁННАЯ МОДЕЛЬ РЕАЛЬНОГО ГАЗА

Поскольку у газов при нормальных условиях расстояния между молекулами намного больше размеров самих молекул, можно рассматривать молекулы газа как материальные точки или очень маленькие твёрдые шарики. Кроме того, силы, действующие между молекулами на таких расстояниях, очень малы, поэтому ими можно пренебречь. Следовательно, наиболее простой моделью реального газа является *идеальный газ, состоящий из молекул, которые сталкиваются между собой как упругие шарики и между которыми отсутствуют силы взаимодействия.*

Атмосферный воздух можно считать идеальным газом при решении различных задач. Законы, полученные при помощи модели идеального газа, подтверждаются экспериментально. Однако модель идеального газа применима не всегда.

ДАВЛЕНИЕ ГАЗА

Газ, содержащийся в сосуде, всегда полностью заполняет его объём. Находясь в непрерывном движении, молекулы газа сталкиваются друг с другом и со стенками сосуда, в котором находятся. Давление газа на стенки сосуда (и на помещённое в газ тело) вызывается ударами молекул газа. С макроскопической точки зрения можно говорить о значении давления газа в сосуде. Так, если в закрытый сосуд накачать воздух при помощи насоса и соединить его с манометром, то он покажет значение этого давления. Но с микроскопической точки зрения в одних местах сосуда в какой-то момент времени молекул больше, а в других местах меньше, в одних местах молекулы газа ударяют о стенки сосуда, в то время как в других местах удары отсутствуют. При этом с течением времени ситуация беспорядочно изменяется. Манометр не чувствует удара отдельной молекулы и не реагирует на непрерывно меняющуюся ситуацию, так как масса отдельной молекулы газа очень мала, мала и сила её удара. Но при обычных условиях в 1 см^3 газа содержится примерно 10^{19} молекул, поэтому манометр показывает среднюю по времени силу, действующую на единицу площади его мембраны.



СРЕДНЯЯ СКОРОСТЬ ДВИЖЕНИЯ МОЛЕКУЛ ГАЗА

Для того чтобы понять, как скорость движения молекул газа влияет на его макроскопические параметры, не нужно знать скорость каждой из молекул газа. Количество молекул даже в небольшом объёме огромно, и характер их теплового движения сложен. Молекулы движутся хаотично, сталкиваясь друг с другом, поэтому их скорости различаются по модулю и направлениям скоростей отдельных молекул непрерывно изменяются. Следовательно, при изучении влияния скорости движения молекул на другие макроскопические параметры имеет смысл говорить о *среднем значении модуля скорости*.

Вы уже знаете, что *температура является мерой средней кинетической энергии молекул тела*. А кинетическая энергия зависит от квадрата скорости. Поэтому в молекулярно-кинетической теории большую роль играет именно *среднее значение квадрата скорости* молекул.

Пусть в некотором объёме газа содержится N молекул и $v_1, v_2, \dots, v_N$ — модули их скоростей. Тогда среднее значение квадрата скорости молекул находят по формуле

$$\overline{v^2} = \frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N}. \quad (1)$$

Скорость — векторная физическая величина, поэтому если её проекции на координатные оси OX , OY и OZ равны соответственно v_x , v_y и v_z , то квадрат модуля скорости равен

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2. \quad (2)$$

Аналогично формуле (1) можно говорить о средних значениях квадратов проекций скорости на координатные оси: $\overline{v_x^2}$, $\overline{v_y^2}$, $\overline{v_z^2}$. Тогда можно записать:

$$\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}. \quad (3)$$

Все молекулы газа движутся хаотично, меняя направление своего движения после каждого столкновения друг с другом, поэтому все направления в пространстве равноправны. В связи с этим можно говорить о том, что *средние значения квадратов проекций скорости на координатные оси равны между собой*:

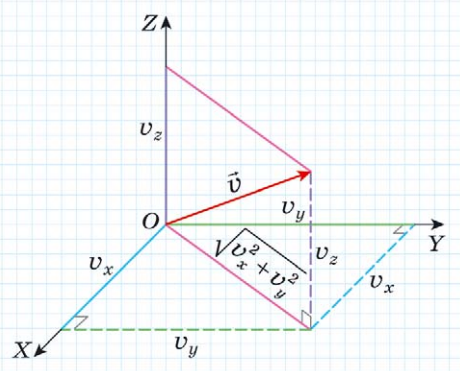
$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}. \quad (4)$$

Тогда

$$\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_x^2} + \overline{v_x^2} = 3\overline{v_x^2}, \text{ или}$$

$$\overline{v_x^2} = \frac{1}{3}\overline{v^2}. \quad (5)$$

Формула (5) показывает, что средний квадрат проекции скорости (на любую координатную ось) равен одной трети квадрата самой скорости. Множитель $\frac{1}{3}$ говорит о том, что наше пространство является трёхмерным и любой вектор в пространстве имеет три проекции.



Рассмотрим подробнее вывод формулы (3).

Согласно формуле (1)

$$\overline{v^2} = \frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N}.$$

Каждое слагаемое в числителе можно представить в виде суммы квадратов проекций:

$$\overline{v^2} = \left[(v_{1x}^2 + v_{1y}^2 + v_{1z}^2) + \dots + (v_{Nx}^2 + v_{Ny}^2 + v_{Nz}^2) \right] / N.$$

Перегруппировав слагаемые, получим

$$\begin{aligned} \overline{v^2} &= (v_{1x}^2 + \dots + v_{Nx}^2 + v_{1y}^2 + \dots + v_{Ny}^2 + v_{1z}^2 + \dots + v_{Nz}^2) / N = \\ &= \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}. \end{aligned}$$

ВОПРОСЫ:

- Что такое идеальный газ?
- Почему газ оказывает давление?
- Как найти среднее значение квадрата скорости молекул через скорости отдельных молекул?
- Как найти среднее значение квадрата скорости через проекции?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

● Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа.

● Упрощённый вывод основного уравнения молекулярно-кинетической теории идеального газа.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое идеальный газ?
- Почему газ оказывает давление?



Если обозначить величины: концентрация молекул — n , масса молекулы — m_0 , среднее значение квадрата скорости молекул — $\overline{v^2}$, средняя кинетическая энергия молекул — $\overline{E}$, то основное уравнение молекулярно-кинетической теории имеет вид

$$p = \frac{\overline{F}}{S} = \frac{1}{3} m_0 n \overline{v^2},$$

или

$$p = \frac{2}{3} n \overline{E}.$$



Рудольф Юлиус Эммануэль Клаузиус
(1822—1888)

Немецкий физик и математик, один из основателей термодинамики и МКТ.

ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

В XIX в. было получено уравнение, позволяющее объяснить давление газа на стенки сосуда не только качественно, но и количественно.

ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Молекулы идеального газа, беспорядочно двигаясь, ударяются о стенки сосуда. Очевидно, что, чем быстрее движутся молекулы, тем больше сила их удара о стенку сосуда и, следовательно, больше давление. Но чем больше масса отдельной молекулы, тем больше сила удара о стенку и, следовательно, больше давление. Кроме этого, на давление влияет количество молекул в единице объёма газа: чем больше молекул, тем чаще они ударяются о стенки сосуда и тем больше давление. Среднее значение силы $\overline{F}$, с которой молекулы действуют на единицу площади сосуда в единицу времени — это и есть давление газа. При этом не имеет смысла говорить о скорости отдельной молекулы газа: давление зависит от средней скорости молекул.

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа имеет вид

$$p = \frac{\overline{F}}{S} = \frac{1}{3} m_0 n \overline{v^2}, \quad (1)$$

где n — концентрация молекул (число молекул в единице объёма); m_0 — масса молекулы; $\overline{v^2}$ — среднее значение квадрата скорости молекул.



Клаузиус внёс значительный вклад в разработку кинетической теории газов. В своей работе «О роде движения, который мы называем теплотой», опубликованной в журнале «Анналы физики» (1857), он вывел уравнение состояния газа, которое сейчас называют основным уравнением МКТ.

СВЯЗЬ ДАВЛЕНИЯ СО СРЕДНЕЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИЕЙ

МОЛЕКУЛ Кинетическая энергия поступательного движения одной молекулы

$$E = \frac{m_0 v^2}{2}.$$

Тогда средняя кинетическая энергия молекул равна

$$\overline{E} = \frac{m_0 \overline{v^2}}{2}. \quad (2)$$

С учётом формулы (2) формулу (1) можно записать в виде

$$p = \frac{2}{3} n \overline{E}. \quad (3)$$

Давление идеального газа пропорционально произведению концентрации молекул и средней кинетической энергии поступательного движения молекул.

УПРОЩЁННЫЙ ВЫВОД ОСНОВНОГО УРАВНЕНИЯ

МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Строгий вывод основного уравнения МКТ достаточно сложен, поэтому мы приведём здесь его упрощённый вывод.

Пусть молекула массой m_0 ударяется о стенку сосуда. При ударе её импульс изменяется, при этом для проекции на ось OX $\Delta p_x = m_0(v_x - v_{0x})$. Поскольку при ударе изменяется только направление скорости, а её модуль не изменяется, то

$$\Delta p_x = 2m_0v_x. \quad (4)$$

Молекула меняет импульс потому, что со стороны стенки сосуда на неё действует сила $\vec{F}_1$. По второму закону Ньютона изменение импульса молекулы равно импульсу силы $\vec{F}_1$:

$$F_1 \Delta t = 2m_0v_x. \quad (5)$$

По третьему закону Ньютона сила $\vec{F}_1$, действующая на молекулу со стороны стенки сосуда, равна по модулю и противоположна по направлению силе $\vec{F}_2$, с которой молекула действует на стенку сосуда. Следовательно, сила, с которой одна молекула действует на стенку сосуда, равна

$$F_2 = \frac{2m_0v_x}{\Delta t}. \quad (6)$$

За единицу времени каждая молекула действует на стенку с силой F_2 , численно равной $2m_0v_x$. Если обозначить через Z количество столкновений всех молекул со стенкой сосуда, то за единицу времени они будут действовать на неё с силой

$$\bar{F} = 2m_0\bar{v}_x Z. \quad (7)$$

Число Z пропорционально концентрации молекул n (числу молекул в единице объёма), а также средней скорости молекул v_x . Кроме этого, число Z пропорционально площади S поверхности стенки. Ещё необходимо учесть, что поскольку молекулы могут двигаться в любом направлении, то можно считать, что половина молекул летит по направлению к стенке сосуда, а половина — в противоположном направлении. Поэтому число ударов молекул о стенку сосуда за единицу времени

$$Z = \frac{1}{2}n\bar{v}_x S. \quad (8)$$

Подставляя уравнение (8) в уравнение (7), получаем

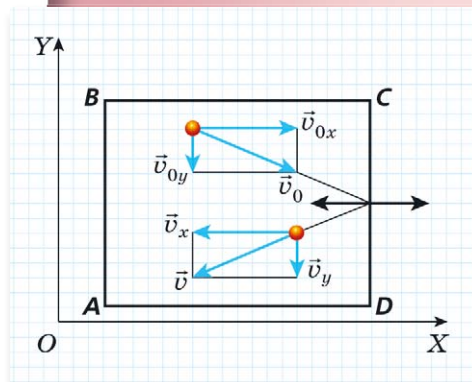
$$\bar{F} = 2m_0\bar{v}_x \frac{1}{2}n\bar{v}_x S = m_0n\bar{v}_x^2 S. \quad (9)$$

Учитывая, что $\bar{v}_x^2 = \frac{1}{3}\bar{v}^2$, получаем

$$\bar{F} = \frac{1}{3}m_0n\bar{v}^2 S. \quad (10)$$

Следовательно,

$$p = \frac{\bar{F}}{S} = \frac{1}{3}m_0n\bar{v}^2. \quad (11)$$



Если обозначить величины: концентрация молекул — n , масса молекулы — m_0 , среднее значение квадрата скорости молекул — $\bar{v}^2$, то давление идеального газа можно рассчитать по формуле

$$p = \frac{1}{3}m_0n\bar{v}^2.$$

ЗАДАНИЕ:

Объясните физический смысл основного уравнения молекулярно-кинетической теории.

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Каким образом впервые были экспериментально измерены скорости молекул.
- Что такое распределение молекул по скоростям.

ВСПОМНИТЕ:

- Чему равна угловая скорость вращения?
- Что такое погрешность эксперимента?

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ МОЛЕКУЛ. ОПЫТ ШТЕРНА

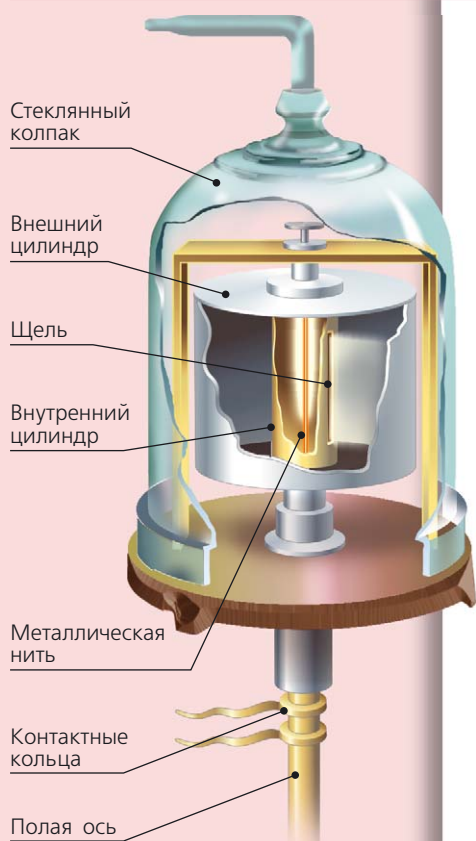
Теоретические представления о скоростях движения молекул сформировались во второй половине XIX в., но достаточно долго не были подтверждены экспериментально. Впервые эксперимент по измерению скорости движения молекул выполнил в 1920 г. немецкий физик Отто Штерн.

ОПЫТ ШТЕРНА Прибор Штерна состоял из двух цилиндров разного радиуса, закреплённых на общей оси. Цилиндры могли вращаться с постоянной угловой скоростью. Во внутреннем цилиндре была узкая щель, а на оси располагалась покрытая серебром платиновая проволока. При пропускании электрического тока через платиновую проволоку она нагревалась до температуры примерно 900°C . Атомы серебра испарялись с поверхности проволоки. В пространстве между цилиндрами с помощью насосов откачивался воздух, чтобы испаряющиеся атомы не соударялись с молекулами воздуха и двигались прямолинейно. Часть атомов серебра проходила через узкую щель и осаждалась в виде узкой светлой полосы на внутренней поверхности большого цилиндра. Внешний цилиндр имел комнатную температуру, чтобы атомы серебра «прилипали» к его поверхности. При неподвижном приборе слой серебра образовывался точно напротив щели. Затем соединённые вместе цилиндры приводили в быстрое вращение вокруг оси. В этом случае полоска осевших атомов оказывалась размытой и смещённой. Почему?

Введём обозначения: внутренний цилиндр — A , его радиус — R_A , внешний цилиндр — B , его радиус — R_B , щель во внутреннем цилиндре — O , проволочка — C . При неподвижных цилиндрах атомы серебра, двигаясь прямолинейно, оседают в точке D (точнее, в некоторой области, соответствующей размеру щели O).

Затем цилиндры приводили во вращение с достаточно большой угловой скоростью. В этом случае, пока за время t атомы пройдут расстояние $R_B - R_A$, цилиндры повернутся на угол φ . Поэтому прямолинейно движущиеся атомы попадут на внутреннюю поверхность внешнего цилиндра в точке D' , находящейся на расстоянии s от точки D . Длина s дуги равна пути, проходимому точками цилиндра за время t полёта атома серебра от щели O до цилиндра, т.е. если модуль скорости вращения внешнего цилиндра v_B , то $s = v_B t$. Но если обозначить скорость атомов через v , то

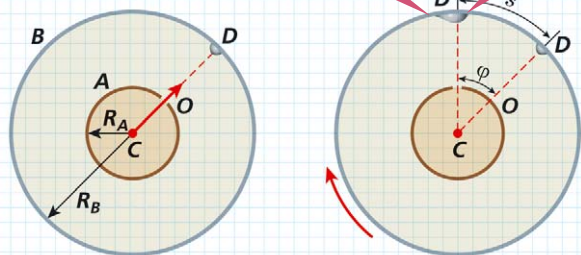
$$t = \frac{R_B - R_A}{v}.$$



Места попадания
молекул серебра

самых
медленных

самых
быстрых



Получаем

$$s = v_B \frac{R_B - R_A}{v}$$

Отсюда

$$v = v_B \frac{R_B - R_A}{s}. \quad (1)$$

Если в формуле перейти от скорости v_B вращения точек поверхности внешнего цилиндра к его угловой скорости $\omega = 2\pi n$, где n — частота вращения, то можно записать: $v_B = 2\pi n R_B$ и

$$v = \omega R_B \frac{R_B - R_A}{s} = 2\pi n R_B \frac{R_B - R_A}{s}. \quad (2)$$

Длина s дуги измерялась по расстоянию между налётами металла при покоем и вращающемся цилиндре, расстояния R_A и R_B , а также частота вращения диска известны из опыта. Поэтому стало возможным экспериментальное получение скоростей движения атомов серебра и других металлов.

Однако при проведении экспериментов след от атомов, осевших на внешнем диске, оказался размытым. Во-первых, это обусловлено тем, что при тепловом движении атомы движутся с различными скоростями. Поэтому при использовании формул (1) или (2) надо понимать, что речь идёт о средней скорости молекул (атомов). Во-вторых, щель O имеет геометрические размеры, поэтому атомы, пролетающие через неё, могут пролетать как по её левому краю, так и по правому краю или где-то посередине. Даже если щель будет очень узкой, всё равно невозможно полностью избежать экспериментальных погрешностей.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МОЛЕКУЛ ПО СКОРОСТЯМ Опыты, проведённые по методике Штерна, показали, что в пучке присутствуют молекулы (атомы) со скоростями, достаточно сильно различающимися по модулю. Причём оказалось, что доли быстрых и медленных молекул в пучке различны.

Перед экспериментаторами встала непростая задача определения числа молекул, движущихся с той или иной скоростью. Эта задача была успешно решена с помощью более совершенных установок, чем в опыте Штерна. Причём оказалось, что экспериментально можно определить относительное число молекул, скорости которых лежат в интервале от v до $v + \Delta v$. Вопрос стоял следующим образом: если в единице объёма находится N молекул, то какая доля молекул $\Delta N/N$ имеет скорости от v до $v + \Delta v$? В опыте определялись доли молекул, отнесённые к интервалу Δv : $\Delta N/N\Delta v$. Эксперименты показали, что существует скорость, с которой движется наибольшее число молекул. Её называют **наиболее вероятной скоростью**. Большинство молекул движется со скоростями, близкими к этой скорости, и только очень небольшая доля молекул имеет скорости, сильно отличающиеся от наиболее вероятной.

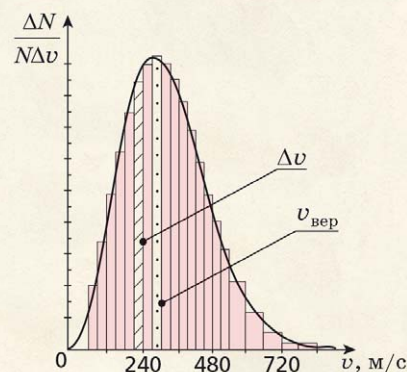


Отто Штерн

(1888—1969)

Немецкий физик-экспериментатор, исследователь в области молекулярной и квантовой физики.

Опыт Штерна позволил установить, что скорости молекул могут превышать сотни метров в секунду. Различная толщина серебряной полоски на внешнем цилиндре при разных значениях угла поворота свидетельствует о том, что в распределении молекул по скоростям имеются доли молекул с разными значениями скоростей.



ВОПРОСЫ:

- В чём заключается основная идея опыта Штерна?
- Что такое распределение молекул по скоростям?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое тепловое равновесие.
- В чём преимущество газового термометра перед жидкостным.

ВСПОМНИТЕ:

- Как температура тела связана со скоростью движения его молекул?
- На чём основан принцип действия термометра?
- Что такое теплопередача?

Определение теплового равновесия означает, что если тело или система тел находится в состоянии теплового равновесия, то неизменной оказывается не только температура, но и другие макроскопические параметры, такие, как объём, давление и т. д. Например, не имеет смысла говорить о показаниях ртутного термометра до тех пор, пока столбик ртути в нём не перестанет изменять свой объём.



В температурной шкале, градуированной в градусах Цельсия ($^{\circ}\text{C}$), за нуль принимается температура таяния льда, а за 100° — температура кипения воды при нормальном атмосферном давлении. Расстояние между отметками разделено на сто равных частей по 1°C .

ТЕМПЕРАТУРА. ТЕПЛОВОЕ РАВНОВЕСИЕ. ТЕРМОМЕТРЫ

Для определения температуры недостаточно наших органов чувств, поэтому необходим соответствующий измерительный прибор.

ТЕПЛОВОЕ РАВНОВЕСИЕ Температура измеряется при помощи специального измерительного прибора — термометра. При измерении температуры тела термометром всегда требуется некоторое время. Почему? Дело в том, что при непосредственном контакте двух тел с разными температурами происходит теплопередача — передача энергии от тела с более высокой температурой к телу, температура которого изначально была ниже. Когда температуры тел становятся равными, теплопередача прекращается и тела приходят в состояние **теплового равновесия** друг с другом. При этом процесс теплопередачи необратим. Это означает, что невозможен самопроизвольный процесс передачи внутренней энергии от холодного тела к нагретому. Следовательно, прежде чем снимать показания термометра, необходимо, чтобы его собственная температура стала равна температуре тела, т.е. термометр с телом пришли в состояние теплового равновесия.

Система тел находится в состоянии теплового равновесия, если макроскопические параметры, описывающие систему, одинаковы для всей системы и не меняются во времени. Действительно, если тело не находится в состоянии теплового равновесия, говорить о его температуре не имеет смысла. Например, при нагревании воды в сосуде разные слои жидкости имеют разную температуру, и мы не можем говорить о температуре воды во всём сосуде до тех пор, пока либо вся жидкость не нагреется до температуры кипения воды — 100°C , либо нагревание не прекратится и постепенно вода в сосуде не придёт в состояние теплового равновесия.

ТЕРМОМЕТРЫ Вы уже знаете, что тела при нагревании расширяются, а при охлаждении сжимаются. Принцип действия термометра основан на зависимости объёма тела от температуры. Вещество, используемое в термометре, увеличивается в объёме при повышении температуры, а при охлаждении уменьшается в объёме. В термометрах могут быть использованы различные вещества: жидкие (спирт, ртуть), твёрдые (металлы) или газообразные. Термометр, как и любой измерительный прибор, имеет шкалу. Для построения шкалы температур выбирают две основные (реперные) точки, которым приписывают определённые значения температуры. Затем интервал между ними делят на несколько равных частей, которые соответствуют единицам данной температурной шкалы.

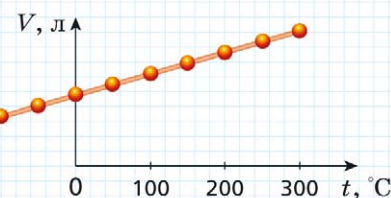
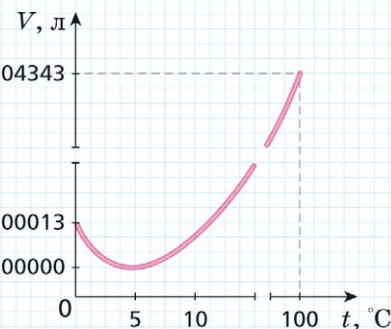
ЖИДКОСТНЫЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Принцип действия жидкостного термометра основан на том, что жидкости при нагревании расширяются, а при охлаждении сжимаются. Но характер теплового расширения жидкостей различен. Следовательно, при градуировке шкалы термометра необходимо учитывать, какая жидкость будет в нём использоваться. Это хорошо видно, если сравнить расстояния между соседними делениями (градусами) на спиртовом и ртутном термометрах, — эти расстояния неодинаковы.

Особый интерес с этой точки зрения представляет поведение водяного термометра. В отличие от большинства жидкостей, которые при повышении температуры расширяются достаточно равномерно, вода ведёт себя совершенно иначе при нагревании от 0 до 4°C. В этом температурном диапазоне при нагревании объём воды уменьшается! А уже при температурах выше 4°C вода при нагревании расширяется.

Характер расширения твёрдых тел при нагревании также различен.

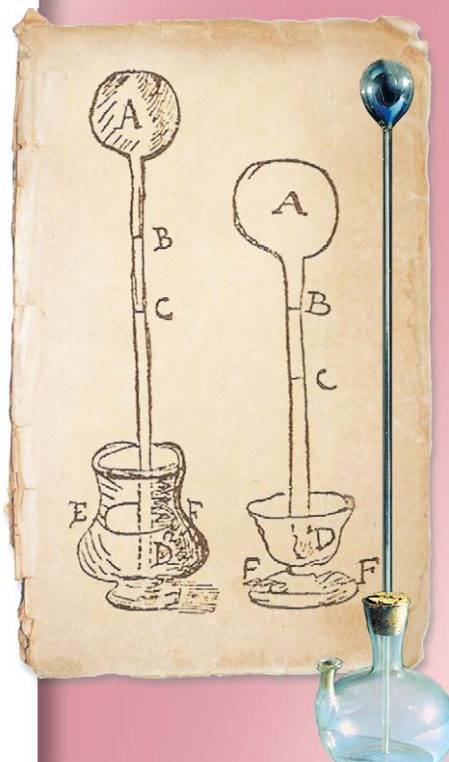
Опытным путём было установлено, что, *в отличие от жидкостей и твёрдых тел, газы при нагревании ведут себя одинаково*. Поэтому полезно рассмотреть работу газового термометра.



ГАЗОВЫЙ ТЕРМОМЕТР

Газовый термометр — прибор для измерения температуры, принцип действия которого основан на зависимости давления или объёма идеального газа от температуры. Различают *газовые термометры постоянного давления* и *газовые термометры постоянного объёма*. Если в газовом термометре давление газа не слишком велико и поддерживается постоянным, то при повышении температуры газ расширяется примерно по линейному закону. При низких температурах газ становится жидкостью, поэтому работу газового термометра можно рассматривать только в ограниченном диапазоне температур. Устройство газового термометра постоянного давления мы рассмотрим несколько позже.

Газовый термометр для точных измерений достаточно сложное устройство. Поэтому его основное назначение — использование для градуировки более простых термометров.



Термометры, которые делал Галилей (около 1597г.), состояли из стеклянного шара A, наполненного воздухом, от нижней части шара отходила частично заполненная водой трубка, которая заканчивалась в сосуде D, также наполненном водой. Когда воздух в шаре расширялся, например от тепла руки, уровень воды в стеклянной трубке опускался, а в сосуде поднимался. Но высота столбика зависела как от температуры, так и от атмосферного давления. Поэтому фактически термометр Галилея измерял нечто неопределённое и позволял лишь сравнивать температуры разных тел в одно и то же время и в одном и том же месте.

ВОПРОСЫ:

- Что такое тепловое равновесие?
- Чем вызваны проблемы градуировки жидкостных термометров?
- В чём преимущество газового термометра перед жидкостным?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое изопроцессы.
- Какой процесс называется изобарным.
- Что такое абсолютная температура.
- Закон Гей-Люссака.

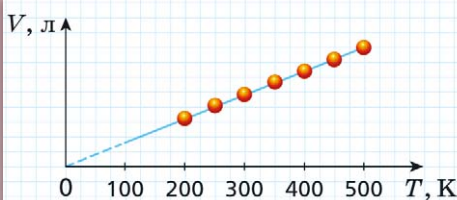
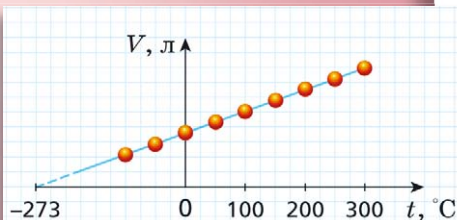
ВСПОМНИТЕ:

- Что вы знаете о температурной шкале Кельвина?
- Как ведут себя газы при нагревании?



Жозеф Луи Гей-Люссак
(1778—1850)

Французский физик и химик. Открыл физический закон, названный его именем. Заложил основы классической химии.



ИЗОПРОЦЕССЫ. ЗАКОН ГЕЙ-ЛЮССАКА. АБСОЛЮТНАЯ ТЕМПЕРАТУРА

Основными макроскопическими параметрами, характеризующими идеальный газ, заключённый в сосуд, являются его масса, объём, который он занимает, температура и давление. Все эти параметры связаны друг с другом.

ИЗОПРОЦЕССЫ Исторически изучение газовых процессов началось с экспериментального изучения поведения газа заданной массы, когда один из трёх параметров — давление, объём или температура — остаётся неизменным, а два других параметра меняются. Такие процессы называют **изопроцессами** (от греч. *изос* — равный).

ИЗОБАРНЫЙ ПРОЦЕСС Процесс, происходящий с газом данной массы, при котором давление остаётся постоянным, называют **изобарным**. При изобарном процессе изменяются объём и температура газа.

Количественное исследование зависимости объёма газа от температуры при неизменном давлении было проведено в 1802 г. Ж. Гей-Люссаком. Опыты показали, что *при изобарном процессе объём газа увеличивается линейно с ростом температуры*.

График зависимости объёма от температуры при изобарном процессе называют **изобарой**. Изобара — прямая линия. Поскольку при низких температурах газ превращается в жидкость, этот график нельзя продолжить левее точки, соответствующей температуре конденсации газа. Однако если изобару продолжить пунктирной линией вплоть до пересечения с осью абсцисс, то она пересечёт её в точке, соответствующей примерно температуре -273 °C.

Подобные графики можно построить для любых газов, и во всех случаях изобары пересекут ось абсцисс при температуре -273 °C. Вид этих графиков привёл к гипотезе о том, что температура -273 °C является наименьшей достижимой температурой. Поэтому температура, равная -273 °C, была названа **абсолютным нулём** температур.

В настоящее время экспериментально установлено, что все газы при температуре около абсолютного нуля находятся в конденсированном состоянии, т.е. являются жидкостями. Эти жидкости обладают целым рядом необычных свойств, таких, как сверхтекучее состояние жидкого гелия. В открытие и изучение сверхтекучести большой вклад внесли советские учёные Л.Д. Ландау и П.Л. Капица. За эти работы они были удостоены Нобелевских премий.

АБСОЛЮТНАЯ, ИЛИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ, ТЕМПЕРАТУРА

В 1848 г. английский физик Уильям Томсон (Кельвин) предложил ввести новую градуировку шкалы температур. Кельвин предложил в качестве нулевого значения

температуры использовать абсолютный нуль. Эту шкалу называют **абсолютной** или **термодинамической шкалой температур**, а температуру, измеренную по этой шкале, называют абсолютной (термодинамической) температурой и обозначают буквой T .

Единица абсолютной температуры — **кельвин (К)**: $1 \text{ К} = 1^\circ\text{С}$. По абсолютной шкале температура таяния льда равна $273,15 \text{ К}$, а температура кипения воды равна $373,15 \text{ К}$.

В дальнейшем в основном будет использоваться абсолютная температура. Из её определения следует, что соотношение между абсолютной температурой $T(\text{К})$ и температурой $t(^{\circ}\text{С})$ по шкале Цельсия можно записать в виде $T = t + 273$.

В современных экспериментах учёным удалось практически вплотную приблизиться к абсолютному нулю температур, который составляет $-273,15^\circ\text{С}$.

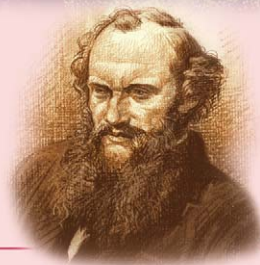
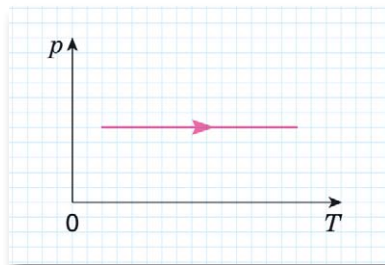
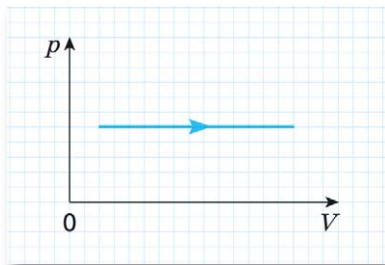
ЗАКОН ГЕЙ-ЛЮССАКА Если температуру измерять по абсолютной шкале, закон Гей-Люссака будет означать, что при изобарном процессе объём газа увеличивается прямо пропорционально увеличению температуры. Следовательно, если на графике по оси абсцисс отложить абсолютную температуру, а по оси ординат — объём газа, то для различных давлений изобары будут выглядеть как прямые, имеющие различный угол наклона и проходящие через начало координат. Таким образом, при постоянном давлении уравнение зависимости объёма газа от его температуры можно записать так:

$$V = \text{const} \cdot T.$$

Закон Гей-Люссака гласит: для данной массы газа при изобарном процессе отношение объёма газа к его температуре постоянно:

$$\frac{V}{T} = \text{const} \text{ при } p = \text{const}.$$

Графики зависимости давления от объёма и давления от температуры при изобарном процессе выглядят как прямые, параллельные оси абсцисс.



Уильям Томсон (Кельвин)

(1824—1907)

Английский физик, один из создателей той области науки, которую в наше время называют термодинамикой.



Если обозначить величины: объём газа — V , абсолютная температура — T , давление — p , то закон Гей-Люссака имеет вид

$$\frac{V}{T} = \text{const} \text{ при } p = \text{const}.$$

ВОПРОСЫ:

- Что такое изопроцессы?
- Какой процесс называется изобарным?
- Что такое абсолютная температура?
- Как формулируется закон Гей-Люссака?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Какой процесс называют изотермическим.
- Закон Бойля–Мариотта.
- Какой процесс называют изохорным.
- Закон Шарля.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое изопроцесс?
- Закон Гей-Люссака.



Роберт Бойль
(1627—1691)

Англо-ирландский физик и химик. По некоторым данным, первым выдвинул гипотезу о существовании химических элементов. Доказал, что воздух необходим для горения и дыхания.



Эдм Мариотт
(1620—1684)

Французский физик, аббат. Независимо от Р.Бойля (1662) открыл один из газовых законов (1676).

ЗАКОН БОЙЛЯ—МАРИОТТА. ЗАКОН ШАРЛЯ

Первыми законами, установленными для разреженных газов неизменной массы, были законы, описывающие их поведение при постоянной температуре, а также при постоянном объёме.

ИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС Процесс, происходящий с газом данной массы, при котором температура остаётся постоянной, называют **изотермическим**. При изотермическом процессе изменяются объём и давление газа.

При проведении экспериментов с газом данной массы при постоянной температуре было обнаружено, что объём газа обратно пропорционален его давлению: $V \sim 1/p$, т.е. при изотермическом процессе при увеличении объёма газа давление уменьшается и, наоборот, при уменьшении объёма давление увеличивается.

Экспериментально зависимость давления газа от его объёма при изотермическом процессе была установлена в 1662 г. Р.Бойлем и несколько позже французским учёным Э.Мариоттом.

ЗАКОН БОЙЛЯ—МАРИОТТА Закон Бойля–Мариотта гласит: для данной массы газа при изотермическом процессе произведение давления газа на его объём остаётся постоянным: $pV = \text{const}$ при $T = \text{const}$.

Обозначим начальный и конечный объёмы газа заданной массы как V_1 и V_2 и начальное и конечное давления как p_1 и p_2 . На основании закона Бойля–Мариотта получаем

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}.$$

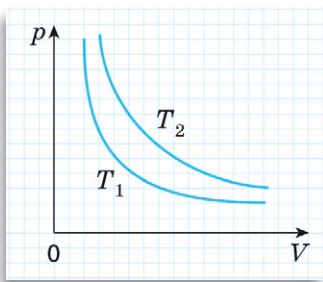


График зависимости давления от объёма при изотермическом процессе называют **изотермой**. Поскольку изотерма соответствует обратной зависимости давления от объёма, то она уже не будет прямой. Такой график называют гиперболой.

Для разреженных газов закон Бойля–Мариотта выполняется с высокой степенью точности. Однако для сильно сжатых или охлаждённых газов обнаруживаются заметные отклонения.

ИЗОХОРНЫЙ ПРОЦЕСС Процесс, происходящий с газом данной массы, при котором объём остаётся постоянным, называют **изохорным**. При данном процессе изменяются давление и температура газа.

Исследования изохорных процессов были впервые проведены в 1787 г. французским учёным Ж.Шарлем.

Его опыты можно воспроизвести при помощи газового термометра постоянного объёма. Баллон, заполненный газом, соединён с ртутным манометром узкой изогнутой трубкой. При измерении баллон *C* погружают в жидкость, температуру которой измеряют. Объём газа в баллоне поддерживают постоянным, поднимая или опуская трубку с ртутью. Давление газа в баллоне равно сумме атмосферного давления и давления столба ртути *AB*. При нагревании газ стремится расшириться, поэтому, поднимая трубку с ртутью, добиваются увеличения внешнего давления, что препятствует расширению газа.

Изменяя (увеличивая) температуру воды в сосуде, можно проследить зависимость изменения давления от изменения температуры. Опыты показали, что *при изохорном процессе давление газа увеличивается линейно с ростом температуры*.

График зависимости давления от температуры при изохорном процессе называют **изохорой**.

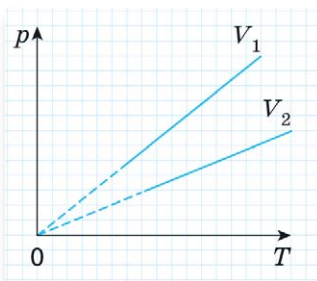
Изохора — прямая линия. Все рассуждения, приведённые при анализе графика изобарного процесса, верны и для изохоры. Если на графике по оси абсцисс отложить абсолютную температуру, а по оси ординат — давление газа, то изохора будет выглядеть как прямая, проходящая через начало координат.

ЗАКОН ШАРЛЯ Если температуру измерять по абсолютной шкале, то закон Шарля гласит: **для данной массы газа при изохорном процессе отношение давления газа к его температуре постоянно:**

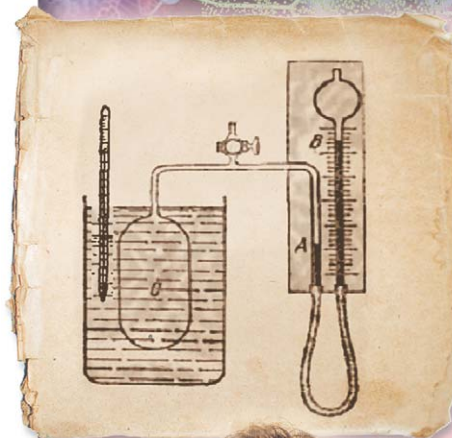
$$\frac{p}{T} = \text{const при } V = \text{const.}$$

Для различных объёмов газа изохоры выглядят как прямые, имеющие различный угол наклона и проходящие через начало координат.

Графики зависимости объёма от давления и объёма от температуры при изохорном процессе выглядят как прямые, параллельные оси абсцисс.



С момента открытия закона Бойля–Мариотта до открытия закона Гей-Люссака прошло около ста лет. Причина в том, что для первого опыта не нужно было точно измерять температуру, важно было только следить за тем, чтобы она не менялась. Но чтобы исследовать зависимость объёма от температуры, надо не только иметь хороший термометр и уметь точно измерять температуру, но и понимать то, чем определяется точность термометра и что такое температура и теплота вообще. В конце XVII в. и на протяжении всего XVIII в. проблема измерения температуры была одной из самых главных и сложных.



Жак Александр Сесар Шарль

(1746—1823)

Французский физик, химик, инженер и воздухоплаватель.



Закон Бойля–Мариотта имеет вид

$$pV = \text{const при } T = \text{const.}$$

Для данной массы газа **закон Шарля** имеет вид

$$\frac{V}{T} = \text{const при } p = \text{const.}$$

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

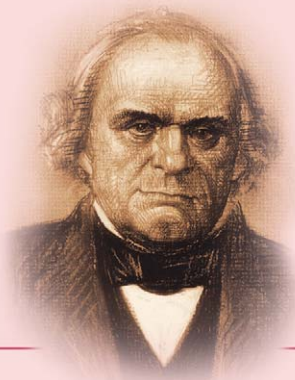
- Какой процесс называют изотермическим?
- Сформулируйте закон Бойля–Мариотта.
- Какой процесс называют изохорным?
- Сформулируйте закон Шарля.

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Уравнение Клапейрона.
- Закон Авогадро.
- Уравнение Менделеева–Клапейрона.

ВСПОМНИТЕ:

- Закон Гей-Люссака.
- Закон Шарля.
- Закон Бойля–Мариотта.
- Что такое постоянная Авогадро?



**Бенуа Поль Эмиль
Клапейрон**
(1799—1864)

Французский физик и горный инженер.

Очевидно, что все три газовых закона для изопроцессов являются частными случаями уравнения Клапейрона.

Например, полагая $p = \text{const}$, получаем закон Шарля $\frac{V}{T} = \text{const}$.

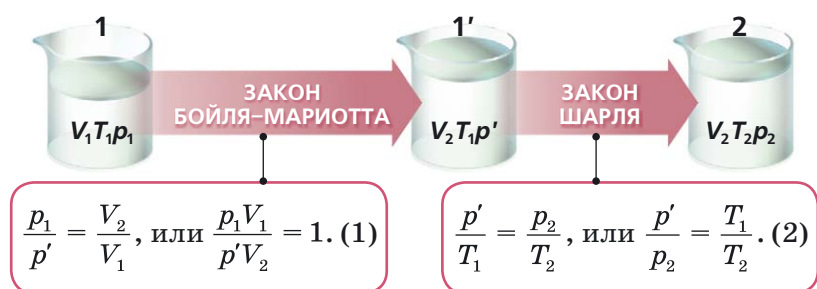
Аналогично, полагая $T = \text{const}$, получаем закон Бойля–Мариотта $pV = \text{const}$.

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Мы рассмотрели изопроцессы — процессы, при которых один из трёх параметров газа (давление, объём или температура) остаётся неизменным. Следующий шаг — изучение связи между давлением, объёмом и температурой некоторой массы газа, если изменяются все три эти величины.

УРАВНЕНИЕ КЛАПЕЙРОНА В 1834 г. Б. Клапейрон выразил соотношение, связывающее давление, объём и температуру данной массы газа в одно соотношение. Это уравнение называют **уравнением состояния газа**.

Пусть газ перешёл из состояния 1 в состояние 2. В начальном состоянии его объём, термодинамическая температура и давление были V_1 , T_1 и p_1 , а в конечном состоянии — V_2 , T_2 и p_2 . Предположим, что переход из состояния 1 в состояние 2 произошёл в два этапа. Сначала изменился объём газа от V_1 до V_2 , причём температура T_1 осталась без изменения. Получившееся при этом давление газа обозначим p' . Затем температура изменилась от T_1 до T_2 при постоянном объёме, причём давление изменилось от p' до p_2 .



Перемножив почленно уравнения (1) и (2) и сократив на p' , получим

$$\frac{p_1 V_1}{p_2 V_2} = \frac{T_1}{T_2}, \quad (3)$$

или

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}. \quad (4)$$

Уравнение (4) называется **уравнением Клапейрона** и может быть записано в виде

$$\frac{pV}{T} = \text{const}. \quad (5)$$

УНИВЕРСАЛЬНАЯ ГАЗОВАЯ ПОСТОЯННАЯ Уравнение Клапейрона можно записать для заданной массы газа. Жизненный опыт говорит о том, что при увеличении массы газа может увеличиваться и объём (при надувании воздушного шарика), и давление (при накачивании насосом велосипедной или автомобильной шины). Точные эксперименты показывают, что при постоянной температу-

ре и постоянном давлении замкнутый объём газа увеличивается прямо пропорционально массе газа, а при постоянной температуре и постоянном объёме газа давление увеличивается прямо пропорционально массе газа, т.е. можно записать:

$$pV \sim mT, \text{ или } \frac{pV}{T} \sim m. \quad (6)$$

Если в соотношение (6) включить коэффициент пропорциональности, то получится равенство. Эксперименты показывают, что для различных газов в соотношении (6) коэффициент пропорциональности различен. Однако если вместо массы m использовать число молей газа ν , то коэффициент пропорциональности для всех газов будет одинаков:

$$pV = \nu RT, \quad (7)$$

где R — коэффициент пропорциональности. Величину R называют **универсальной газовой постоянной**. Её значение одинаково для всех газов и составляет

$$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$$

ЗАКОН АВОГАДРО В 1811 г. итальянский учёный А. Авогадро установил закон, названный законом Авогадро: **при одинаковых температуре и давлении в равных объёмах различных газов содержится одинаковое количество молекул.**

УРАВНЕНИЕ МЕНДЕЛЕЕВА—КЛАПЕЙРОНА Общее число N молекул газа равно числу молекул в одном моле, умноженном на число молей (количество вещества): $N = \nu \cdot N_A$. Подставляя это выражение в формулу (7), получаем

$$pV = \nu RT = \frac{N}{N_A} RT. \quad (8)$$

При этом число N молекул газа можно выразить через массу m газа и его молярную массу M :

$$N = \frac{m}{M} N_A. \quad (9)$$

Подставляя уравнение (9) в уравнение (8), получаем соотношение

$$pV = \frac{m}{M} RT, \quad (10)$$

которое является уравнением состояния идеального газа и называется **уравнением Менделеева—Клапейрона**. Это уравнение было выведено в 1874 г. Д.И. Менделеевым.

ПОСТОЯННАЯ БОЛЬЦМАНА В уравнение (8) входят две постоянные: универсальная газовая постоянная R и число Авогадро N_A .

Обозначим $k = \frac{R}{N_A}$ и подставим k в уравнение (8):

$$pV = NkT. \quad (11)$$

Здесь величина $k = R/N_A$ называется **постоянной Больцмана** и имеет значение $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

Из формулы (7) видно, что если различные газы содержат одинаковое количество молей ν и имеют одинаковое давление и температуру, то они будут занимать один и тот же объём, поскольку постоянная R универсальна, т.е. одинакова для всех газов. Так как число молекул в одном моле для всех газов одно и то же, то уравнение (7) можно считать следствием закона Авогадро.

Если обозначить величины: давление — p , объём газа — V , абсолютная температура — T , масса газа — m , молярная масса — M , универсальная газовая постоянная — R , то уравнение Менделеева—Клапейрона имеет вид

$$pV = \frac{m}{M} RT.$$

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Объясните физический смысл уравнения Клапейрона.
- Как формулируется закон Авогадро?
- Объясните физический смысл уравнения Менделеева—Клапейрона.

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Соотношение между средней кинетической энергией поступательного движения молекул и абсолютной температурой газа.
- Физический смысл постоянной Больцмана.
- Что такое средняя квадратичная скорость молекул и как её найти.

ВСПОМНИТЕ:

- Основное уравнение молекулярно-кинетической теории.
- Уравнение состояния идеального газа.

Если обозначить величины: средняя кинетическая энергия хаотичного поступательного движения молекул газа — $\bar{E}$, постоянная Больцмана — k , то

$$\bar{E} = \frac{3}{2}kT.$$



Людвиг Больцман
(1844—1906)

Великий австрийский физик, один из основоположников молекулярно-кинетической теории.

ТЕМПЕРАТУРА И СРЕДНЯЯ КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ МОЛЕКУЛ

Мы уже говорили о том, что температура является мерой средней кинетической энергии молекул. Теперь пройденный материал позволяет найти это соотношение в виде формулы.

АБСОЛЮТНАЯ ТЕМПЕРАТУРА И СРЕДНЯЯ КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ МОЛЕКУЛ

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории показывает, что давление идеального газа пропорционально произведению концентрации молекул и средней кинетической энергии поступательного движения молекул:

$$p = \frac{2}{3}n\bar{E}. \quad (1)$$

Однако уравнение состояния идеального газа можно записать в виде (см. уравнение (11) из предыдущего параграфа):

$$pV = NkT, \quad (2)$$

где N — общее число молекул газа; k — постоянная Больцмана. Из уравнения (2) получаем

$$p = \frac{N}{V}kT = nkT, \quad (3)$$

где n — концентрация газа. Приравнивая правые части уравнений (1) и (3), получаем

$$\bar{E} = \frac{3}{2}kT. \quad (4)$$

Таким образом, **средняя кинетическая энергия хаотичного поступательного движения молекул газа пропорциональна абсолютной температуре.**

Мы получили количественное соотношение для физического явления, о котором ранее говорили на качественном уровне: чем выше температура, тем быстрее движутся молекулы.

Уравнение (4) проясняет физический смысл абсолютной температуры: *абсолютная температура является мерой средней кинетической энергии молекул.*

Соотношение (4) было получено для идеальных газов. Заметим, что оно получено благодаря предположению о том, что движение атомов и молекул вещества подчиняется законам механики Ньютона.

Из соотношения (4) становится понятен физический смысл абсолютного нуля температур: *при приближении температуры к абсолютному нулю энергия теплового движения молекул также приближается к нулю.*

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ ПОСТОЯННОЙ БОЛЬЦМАНА

Рассмотрим соотношение (4) с точки зрения единиц физических величин, которые в него входят:

$$\text{Дж} = \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \cdot \text{К}.$$

Поскольку температура является мерой энергии, её можно было бы выражать в тех же единицах, например в джоулях. Однако исторически сложилось так, что задолго до того, как стало известно соотношение (4), температуру выражали в градусах. Поэтому постоянная Больцмана является «переводным» коэффициентом и связывает температуру в энергетических единицах и температуру в кельвинах.

СРЕДНЯЯ КВАДРАТИЧНАЯ СКОРОСТЬ МОЛЕКУЛ Соотношение (4) можно использовать, чтобы найти средний квадрат скорости молекул. Поскольку

$$\overline{E} = \frac{m_0 \overline{v^2}}{2}, \quad (5)$$

то с учётом соотношения (4) можно записать:

$$\overline{v^2} = \frac{3kT}{m_0}. \quad (6)$$

Квадратный корень из $\overline{v^2}$ называют **средней квадратичной скоростью молекул** и обозначают $v_{\text{ср.кв}}$:

$$\sqrt{\overline{v^2}} = v_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}. \quad (7)$$

Из формулы (7) видно, что при одинаковой температуре быстрее движутся молекулы того газа, масса молекулы которого меньше.

Умножим числитель и знаменатель правой части формулы (6) на число Авогадро N_A :

$$\overline{v^2} = \frac{3kN_A T}{m_0 N_A}. \quad (8)$$

Учитывая, что постоянная Больцмана и универсальная газовая постоянная связаны соотношением $k = R/N_A$, получаем, что $kN_A = R$. При этом в правой части формулы (8) в знаменателе получаем молярную массу $m_0 N_A = M$. Поэтому формулу (8) можно преобразовать так:

$$\overline{v^2} = \frac{3RT}{M}.$$

Таким образом, среднюю квадратичную скорость молекул газа можно найти по формуле

$$v_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}. \quad (9)$$

Вычисленные по этой формуле при $t = 0^\circ\text{C}$ скорости молекул гелия и углекислого газа получаются примерно $v_{\text{ср.кв}} \approx 1300 \text{ м/с}$ и $v_{\text{ср.кв}} \approx 390 \text{ м/с}$.

Молярная масса гелия $0,004 \text{ кг/моль}$, а молярная масса углекислого газа $0,044 \text{ кг/моль}$, поэтому $M_{\text{угл. газа}}$ больше $M_{\text{гелия}}$ в 11 раз. С учётом формулы (9) средняя квадратичная скорость молекул гелия превышает среднюю квадратичную скорость молекул углекислого газа при одинаковой температуре в $\sqrt{11}$ раз!

Если обозначить величины: универсальная газовая постоянная — R и число Авогадро — N_A , то постоянная Больцмана

$$k = R/N_A.$$

Она имеет значение

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}.$$

Когда во второй половине XIX в. были получены средние квадратичные скорости молекул, многим физикам столь большие скорости казались удивительными. Однако с такими скоростями молекулы движутся на прямолинейных участках траектории между столкновениями. Учитывая, что число столкновений молекул велико, можно утверждать, что траектория движения молекулы — ломаная линия. Поэтому перемещение молекулы существенно меньше пройденного ею пути.

Если обозначить величины: универсальная газовая постоянная — R , абсолютная температура — T , молярная масса — M , то среднюю квадратичную скорость молекул рассчитывают по формуле

$$v_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}.$$

ВОПРОСЫ:

- Каково соотношение между средней кинетической энергией молекул и абсолютной температурой газа?
- Каков физический смысл постоянной Больцмана?
- Что такое средняя квадратичная скорость молекул и как её найти?

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как решать задачи на вычисление средней квадратичной скорости молекул.
- Как решать задачи на анализ изопроцессов в газах.
- Как решать задачи на применение уравнения Менделеева-Клапейрона.
- Как решать задачи на вычисление средней кинетической энергии молекул.

ЗАДАЧА 1 Найдите среднюю квадратичную скорость движения молекул газа, имеющего массу 1 кг и занимающего объём 3 м³ при давлении 300 кПа.

Дано:	СИ	Решение:
$m = 1 \text{ кг}$		Согласно основному уравнению молекулярно-кинетической теории
$V = 3 \text{ м}^3$		
$p = 300 \text{ кПа}$	$3 \cdot 10^5 \text{ Па}$	
$\bar{v}_{\text{кв}} - ?$		$p = \frac{1}{3} n m_0 \bar{v}^2,$

где n — концентрация молекул; m_0 — масса молекулы. С одной стороны, произведение концентрации молекул на массу отдельной молекулы есть плотность газа ρ , поэтому

$$p = \frac{1}{3} \rho \bar{v}^2.$$

С другой стороны, $\rho = \frac{m}{V}$.

$$\text{Поэтому } \bar{v}_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3p}{\rho}} = \sqrt{\frac{3pV}{m}}.$$

Подставив числовые значения, получим $\bar{v}_{\text{кв}} \approx 1640 \text{ м/с}$.

Ответ: $\bar{v}_{\text{кв}} \approx 1640 \text{ м/с}$.

ЗАДАЧА 2 Автомобильную шину надули утром, когда температура воздуха была +7°C. На сколько процентов увеличилось давление воздуха в шине, если днём она нагрелась до 27°C? Изменением объёма шины пренебречь.

Дано:	СИ	Решение:
$t_1 = 7^\circ\text{C}$	$T_1 = 280 \text{ К}$	Поскольку процесс нагревания воздуха является изохорным, то
$t_2 = 27^\circ\text{C}$	$T_2 = 300 \text{ К}$	
$\frac{\Delta p}{p_1} - ?$		$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}.$

Из уравнения изохоры находим: $p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1}$.

Следовательно, увеличение давления
$$\Delta p = p_2 - p_1 = p_1 \frac{T_2 - T_1}{T_1}.$$

Поэтому увеличение давления в процентном отношении равно

$$\frac{\Delta p}{p_1} = \frac{T_2 - T_1}{T_1} \cdot 100\% \approx 7\%.$$

Ответ: $\frac{\Delta p}{p_1} \approx 7\%$.

ЗАДАЧА 3 Из баллона, содержащего газ при температуре 27°C и давлении 200 кПа , выпустили половину газа и затем охладили его до 7°C . Найдите давление оставшегося в баллоне газа.

Дано:	СИ	Решение:
$t_1 = 27^\circ\text{C}$	300 К	Запишем уравнение Менделеева–Клапейрона для каждого состояния газа:
$p_1 = 200\text{ кПа}$		
$t_2 = 7^\circ\text{C}$	280 К	$p_1 V = \frac{m_1}{M} R T_1,$
$m_2 = 0,5 m_1$		$p_2 V = \frac{m_2}{M} R T_2.$
$p_2 = ?$		

Поделив друг на друга левые и правые части уравнений, получим

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{m_1}{m_2} \frac{T_1}{T_2} = 2 \frac{T_1}{T_2}.$$

Следовательно,

$$p_2 = 0,5 p_1 \frac{T_2}{T_1} \approx 93\text{ кПа}.$$

Ответ: $p_2 \approx 93\text{ кПа}$.

ЗАДАЧА 4 Найдите среднюю кинетическую энергию молекулы одноатомного газа и концентрацию молекул при температуре 300 К и давлении $0,9\text{ МПа}$. На сколько процентов возрастёт средняя кинетическая энергия молекулы при увеличении температуры до 400 К ?

Дано:	СИ	Решение:
$T_1 = 300\text{ К}$		Средняя кинетическая энергия молекул идеального газа зависит только от температуры:
$p = 0,9\text{ МПа}$	$9 \cdot 10^5\text{ Па}$	$\bar{E}_{\text{к1}} = \frac{3}{2} k T_1,$
$T_2 = 400\text{ К}$		где $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ — постоянная Больцмана.
$\bar{E}_{\text{к1}} = ?$		
$n = ?$		
$\alpha = \frac{\Delta \bar{E}_{\text{к}}}{\bar{E}_{\text{к1}}} = ?$		

Учитывая, что $p = nkT_1$, получим $n = \frac{p}{kT_1}$.

Изменение средней кинетической энергии при увеличении температуры

$$\Delta \bar{E}_{\text{к1}} = \frac{3}{2} k (T_2 - T_1).$$

Следовательно,

$$\alpha = \frac{\Delta \bar{E}_{\text{к}}}{\bar{E}_{\text{к1}}} = \frac{T_2 - T_1}{T_1}.$$

Подставив числовые значения, получим

$$\bar{E}_{\text{к1}} = 6,2 \cdot 10^{-21}\text{ Дж}; n \approx 2,2 \cdot 10^{25}\text{ м}^{-3}; \alpha \approx 33\%.$$

Ответ: $\bar{E}_{\text{к1}} = 6,2 \cdot 10^{-21}\text{ Дж}; n \approx 2,2 \cdot 10^{25}\text{ м}^{-3}; \alpha \approx 33\%.$





$$\frac{V}{T} = \text{const при } p = \text{const}$$



$$pV = \text{const при } T = \text{const}$$



$$\frac{p}{T} = \text{const при } V = \text{const}$$

ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

● В основе молекулярно-кинетической теории лежат следующие положения: 1) все вещества состоят из мельчайших частиц — атомов и молекул; 2) частицы вещества находятся в непрерывном хаотичном движении; 3) частицы вещества взаимодействуют друг с другом.

● Основной целью молекулярно-кинетической теории является объяснение свойств макроскопических тел и тепловых процессов, происходящих в них, на основе представлений о движении и взаимодействии молекул.

● Количество вещества — это величина, пропорциональная числу частиц (атомов или молекул), содержащихся в теле.

● Молярной массой M вещества называют массу вещества, взятого в количестве один моль.

● Система тел находится в состоянии теплового равновесия, если макроскопические параметры, описывающие систему, одинаковы для всей системы и не меняются во времени.

● Процесс, при котором один из трёх макроскопических параметров — давление, объём или температура — остаётся неизменным, называют изопроцессом.

● Закон Авогадро гласит: при одинаковых температуре и давлении в равных объёмах различных газов содержится одинаковое количество молекул.

● Средняя кинетическая энергия хаотичного поступательного движения молекул газа пропорциональна абсолютной температуре.

$$p = \frac{2}{3} n \bar{\epsilon}$$

МКТ

$$pV = \frac{m}{M} RT$$

ПОДРОБНЕЕ...

Липсон Г. Великие эксперименты в физике. / Г. Липсон. — М.: Мир, 1978.

Сморodinский Я. А. Температура. Вып. 12. / Я. А. Смородинский. — М.: Наука, 1981. — (Библиотечка «Квант»).

Суорц К. л. Э. Необыкновенная физика обыкновенных явлений. Т. 1. / К. л. Э. Суорц. — М.: Наука, 1986.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

● Запах эфира, разбрызганного в углу комнаты, достиг противоположного угла через 15 с. Как согласовать столь малую скорость распространения запаха с большой скоростью движения молекул?

● Объём воздушного пузырька удваивается при подъёме со дна озера на поверхность. Какова глубина озера, если температуру воды считать неизменной?

● В закрытом сосуде находится водород. Газ начинают нагревать, и при некоторой температуре начинается процесс диссоциации молекул. Будет ли при этом выполняться закон Шарля?

Элементы: Популярный сайт
о фундаментальной науке
<http://gotourl.ru/13728>

Универсальная научно-
популярная энциклопедия
Кругосвет
<http://gotourl.ru/13735>



Глава 6

ВЗАИМНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ГАЗОВ, ЖИДКОСТЕЙ И ТВЁРДЫХ ТЕЛ

- АГРЕГАТНЫЕ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА
- ИСПАРЕНИЕ. НАСЫЩЕННЫЙ И НЕНАСЫЩЕННЫЙ ПАР. КИПЕНИЕ
- ВЛАЖНОСТЬ
- КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ И АМОРФНЫЕ ТЕЛА

РАЗДЕЛ II



**МОЛЕКУЛЯРНАЯ
ФИЗИКА**

КОРОТКО О ГЛАВНОМ...

В окно увидела Татьяна
Поутру побелевший двор,
Куртины, кровли и забор,
На стёклах лёгкие узоры,
Деревья в зимнем серебре...

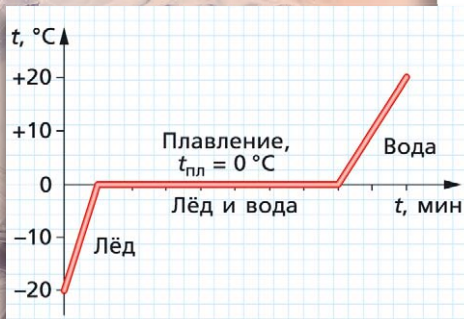
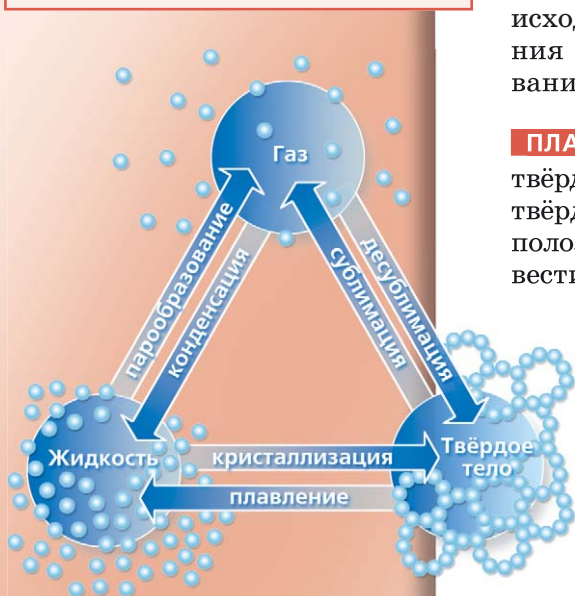
А. С. Пушкин.
«Евгений Онегин»

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое плавление и кристаллизация.
- Что такое парообразование и конденсация.
- Что такое сублимация и десублимация.

ВСПОМНИТЕ:

- Агрегатные состояния вещества.
- Способы перехода вещества из одного агрегатного состояния в другое.



АГРЕГАТНЫЕ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

Переход вещества из одного агрегатного состояния в другое является причиной многих природных явлений, например таких, как образование облаков, тумана и росы, морозного узора на стекле в зимний день и т.д.

ПЕРЕХОД ВЕЩЕСТВА ИЗ ОДНОГО АГРЕГАТНОГО СОСТОЯНИЯ В ДРУГОЕ

Вещества могут переходить из одного агрегатного состояния в другое. Изменение агрегатного состояния вещества всегда связано с выделением или поглощением некоторого количества теплоты.

Всего различают шесть процессов, при которых происходит переход вещества из одного агрегатного состояния в другое: плавление и кристаллизация, парообразование и конденсация, сублимация и десублимация.

ПЛАВЛЕНИЕ И КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ Переход вещества из твёрдого состояния в жидкое называют **плавлением**. В твёрдых телах, в отличие от жидкостей, частицы расположены упорядоченно. Поэтому, для того чтобы перевести частицы из упорядоченного состояния в неупорядоченное, нужно совершить работу по преодолению сил молекулярного притяжения. Внутренняя энергия вещества при этом увеличивается за счёт увеличения энергии взаимодействия молекул. Примерами плавления могут служить таяние льда, плавление металлов в металлургии.

Обратный процесс, связанный с переходом вещества из жидкого состояния в твёрдое, называют **кристаллизацией** или **отвердеванием**. Пример кристаллизации — замерзание воды. Процесс кристаллизации сопровождается уменьшением внутренней энергии вещества за счёт уменьшения энергии взаимодействия молекул.

ПАРООБРАЗОВАНИЕ И КОНДЕНСАЦИЯ Переход вещества из жидкого состояния в газообразное называют **парообразованием**. Обратный процесс, связанный с переходом вещества из газообразного состояния в жидкое, называют **конденсацией**. Пример конденсации — образование росы.

СУБЛИМАЦИЯ (ВОЗГОНКА) И ДЕСУБЛИМАЦИЯ Переход вещества из твёрдого состояния в газообразное (минуя жидкое) называют **сублимацией** или **возгонкой**.

Возгонкой объясняются запахи, которыми обладают многие твёрдые тела. Вылетая из твёрдого тела, молекулы образуют над ним газ (или пар), который и вызывает запах. Разные сорта древесины имеют различный запах. Переход вещества из газообразного состояния в твёрдое

(минуя жидкое) называют **десублимацией**. Пример десублимации — образование на окнах зимой инея. Данный процесс десублимации может осуществляться только на внутренней поверхности оконного стекла, где молекулы паров воды превращаются в кристаллики льда.

АГРЕГАТНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И ПРИРОДНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Каждый из нас, находясь на улице, может почувствовать процесс агрегатного превращения. Для этого достаточно смочить палец слюной и поднять его вверх. Вы сразу почувствуете ощущение холода. Таким способом в старину определяли направление ветра в затишье. Ощущение холода возникает потому, что с поверхности кожи начинает испаряться вода, причём этот процесс заметно усиливается даже при слабом дуновении ветра. Теплота же, необходимая для испарения, отбирается от кожных покровов.

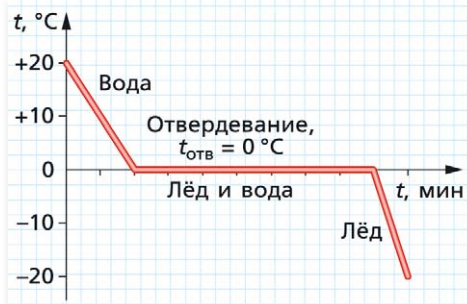
На самом деле, разумеется, проявление агрегатных превращений в природных явлениях гораздо шире и многообразнее. Если и дальше следовать исторической аналогии, то можно задать вопрос: почему крестьяне перед весенними заморозками обильно поливали водой грядки с рассадой и закрывали их сверху любым подходящим материалом? Не зная основ термодинамики, наши предки на опыте убеждались в том, что при замерзании воды в окружающее пространство выделяется теплота. Это тепло и предохраняет растения от заморозков.

Колоссальное влияние на природные явления, связанные с агрегатными превращениями, оказывает круговорот воды в природе. Формирование климатических зон Земли существенно зависит от процессов испарения и конденсации, плавления и кристаллизации воды. Подсчитано, что если бы прекратился круговорот воды в природе, то за один год с поверхности Мирового океана испарился бы слой воды толщиной порядка метра.

ПЛАЗМА Вещество, находящееся в газообразном состоянии и разогретое до температуры сотни тысяч градусов, уже не может состоять из обычных нейтральных атомов. При таких температурах скорости хаотичного движения атомов становятся настолько большими, что при ударе атомы разделяются на более мелкие составляющие — ионы и электроны.

Смесь этих частиц (сильно ионизированный газ) представляет собой особое состояние вещества, называемое **плазмой**.

Плазма является наиболее распространённым состоянием вещества в природе. Солнце, галактические туманности, полярные сияния, молнии, в том числе и шаровые, — всё это различные виды плазмы.



В земных условиях плазма встречается достаточно редко. В ряде технических устройств, например в люминесцентных лампах, также можно наблюдать свечение плазмы.



ВОПРОСЫ:

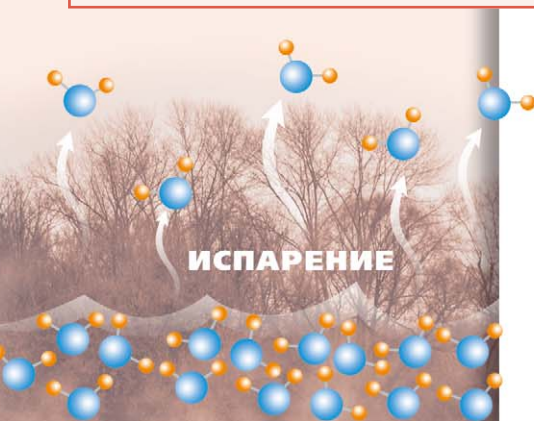
- Чем различаются агрегатные состояния вещества с позиции молекулярно-кинетической теории?
- Что вы знаете о процессах перехода из одного агрегатного состояния вещества в другое?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- От чего зависит скорость испарения.
- Что такое насыщенный и ненасыщенный пар.
- Как происходит процесс кипения.

ВСПОМНИТЕ:

- Как определяются агрегатные состояния вещества согласно микроскопической точке зрения?
- Что такое идеальный газ?
- Что такое парообразование и конденсация?



Процесс конденсации пара, т.е. превращение газа в жидкость, объясняется существованием сил межмолекулярного взаимодействия. Этот процесс возможен только для реальных газов, если между молекулами начинают преобладать силы взаимного притяжения. Используя модель идеального газа, в которой взаимодействие между молекулами не учитывается, описать процесс конденсации невозможно.

ИСПАРЕНИЕ. НАСЫЩЕННЫЙ И НЕНАСЫЩЕННЫЙ ПАР. КИПЕНИЕ

Рассмотрим взаимные превращения жидкости и газа на основе молекулярно-кинетической теории.

ИСПАРЕНИЕ И КОНДЕНСАЦИЯ Вы уже знаете, что переход вещества из жидкого состояния в газообразное называют **парообразованием** и что существует два способа парообразования: **испарение** и **кипение**.

Испарением называют парообразование, происходящее с поверхности жидкости. Молекулы жидкости находятся в состоянии непрерывного хаотичного движения. При этом молекулы имеют различные скорости движения и разные кинетические энергии. Когда у поверхности жидкости оказывается молекула с относительно большой скоростью, она может преодолеть силы притяжения других молекул и вылететь из жидкости. Молекулы, покинувшие поверхность жидкости, образуют над ней пар. В жидкости всегда имеются молекулы, кинетическая энергия которых больше кинетической энергии других молекул, поэтому испарение происходит при любой температуре.

Скорость испарения зависит от температуры, площади поверхности жидкости, движения воздуха над жидкостью и рода жидкости. Чем выше температура жидкости, тем больше средняя скорость движения молекул и тем больше молекул, у которых кинетическая энергия достаточна для того, чтобы преодолеть притяжение соседних молекул и вылететь с поверхности жидкости. Так как жидкость могут покинуть только те молекулы, которые находятся у самой поверхности, то чем больше площадь испаряемой поверхности, тем большее число молекул покидает жидкость. Молекулы, вылетевшие с поверхности жидкости, двигаясь хаотично, могут изменить направление своего движения и вернуться обратно. Если поток воздуха уносит эти молекулы, то испарение жидкости происходит быстрее. Чем слабее силы взаимодействия между молекулами жидкости, тем быстрее происходит процесс испарения. Именно поэтому, например, эфир испаряется быстрее воды. Поскольку при испарении жидкость покидают молекулы, обладающие повышенной кинетической энергией, то средняя кинетическая энергия других молекул уменьшается. Следовательно, температура испаряющейся жидкости понижается. Одновременно с испарением происходит и обратный процесс — конденсация — переход части молекул пара в жидкость.

НАСЫЩЕННЫЙ ПАР В открытом сосуде процесс испарения происходит быстрее, чем обратный процесс конденсации, при этом масса жидкости в сосуде уменьшается. Если же испарение происходит в закрытом сосуде, то

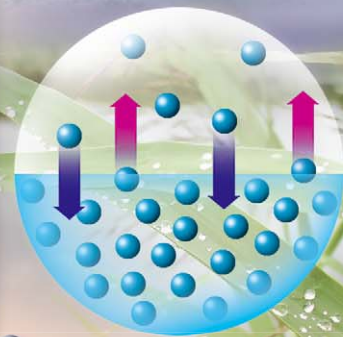
сначала число молекул, покидающих поверхность жидкости в единицу времени, будет больше числа молекул, возвращающихся обратно. При этом плотность паров жидкости в сосуде будет увеличиваться. С увеличением числа молекул пара над поверхностью жидкости возрастает также число молекул, возвращающихся обратно в жидкость. Через некоторое время число вылетающих из жидкости и возвращающихся молекул сравняется. Жидкость и пар приходят в состояние равновесия, которое называют **динамическим**. При этом число молекул пара над жидкостью становится постоянным. При динамическом равновесии масса жидкости в закрытом сосуде не изменяется, хотя процесс испарения продолжается.

Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называют **насыщенным**. Пар, не находящийся в состоянии равновесия со своей жидкостью, называют **ненасыщенным**. В этом случае возможно дальнейшее испарение жидкости.

КИПЕНИЕ Интенсивное парообразование, происходящее по всему объёму жидкости при определённой температуре, называют **кипением**. В отличие от испарения, которое происходит при любой температуре, кипение жидкости происходит при определённой температуре. Температура, при которой жидкость кипит, называют **температурой кипения**. При кипении температура не меняется.

На начальном этапе кипения по мере увеличения температуры усиливается испарение воды. Иногда можно увидеть лёгкий туман над поверхностью воды, состоящий из мельчайших капелек, образовавшихся в воздухе над сосудом в процессе конденсации. На следующем этапе на дне и стенках сосуда появляются маленькие пузырьки растворённого в воде воздуха. При нагревании излишек воздуха выделяется из воды в виде пузырьков. По мере нагревания вода начинает испаряться не только с поверхности жидкости, но и внутри пузырьков, образуя насыщенный пар. Давление внутри пузырьков воздуха возрастает, и пузырьки увеличиваются в объёме. С увеличением размеров пузырьков возрастает и архимедова сила, выталкивающая их из воды. Пузырьки отрываются от дна и стенок сосуда и поднимаются вверх.

Пока вся вода не прогрелась, в верхних, более холодных её слоях часть водяного пара внутри пузырьков конденсируется и превращается в воду. При этом давление внутри пузырьков уменьшается, что приводит к их сжатию вплоть до полного исчезновения. Процессы быстрого роста и схлопывания образующихся пузырьков сопровождаются характерным шумом, обычно предшествующим кипению. Когда же вода прогревается во всём сосуде, те пузырьки, которые поднимаются к поверхности жидкости, уже не сжимаются, а, наоборот, продолжают увеличивать свой объём. Достигнув поверхности, пузырьки лопаются, и пар выходит наружу — вода кипит.



Температура кипения зависит от атмосферного давления. Процесс кипения осуществляется при такой температуре, при которой давление насыщенных паров будет не меньше давления внутри жидкости. Но давление насыщенного пара существенно увеличивается с повышением температуры. Поэтому при повышении атмосферного давления температура кипения увеличивается, а при понижении уменьшается.

При подъёме в горы понижается температура кипения воды, так как атмосферное давление уменьшается.

Зависимость температуры кипения от давления лежит в основе принципа действия кастрюли-скороварки. В ней давление существенно выше атмосферного, поэтому температура кипения составляет около 120 °С. При этом время приготовления пищи существенно сокращается.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- От чего зависит скорость испарения?
- Что такое насыщенный и ненасыщенный пар?
- Что такое динамическое равновесие системы вода — пар?
- Опишите этапы процесса кипения воды.

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое относительная влажность воздуха и как её определить.
- Что такое точка росы.
- Какие приборы используют для определения влажности воздуха.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое парообразование?
- Как происходит испарение?
- Что такое насыщенный и ненасыщенный пар?

В курсе физики 8 класса мы уже вводили понятие относительной влажности воздуха φ как отношение абсолютной влажности ρ к плотности ρ_0 насыщенного водяного пара при той же температуре, выраженное в процентах:

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho_0} \cdot 100\%.$$

Оба определения равнозначны, так как характеризуют степень насыщения воздуха водяным паром.

ВЛАЖНОСТЬ

Воздух, окружающий нас, всегда содержит водяные пары, возникающие вследствие испарения воды с поверхности водоёмов и суши. Количество пара, содержащегося в атмосфере, играет очень важную роль для жизни на Земле, в том числе оказывает влияние на самочувствие человека.

АБСОЛЮТНАЯ И ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ВЛАЖНОСТЬ

Содержание водяного пара в воздухе — важная характеристика погоды и климата. Чем выше температура воздуха, тем больше в нём может быть пара. Так, при температуре $+20^\circ\text{C}$ воздух объёмом 1 м^3 может содержать 17 г водяного пара. В зависимости от количества паров, находящихся при данной температуре в атмосфере, воздух бывает различной степени влажности. Влажность воздуха характеризуется несколькими показателями.

Абсолютная влажность ρ показывает, сколько граммов водяного пара содержится в воздухе объёмом 1 м^3 , т.е. чему равна плотность водяного пара, содержащегося в воздухе. Показатель абсолютной влажности принято выражать в граммах на кубический метр. В экваториальных широтах абсолютная влажность воздуха может достигать 30 г/м^3 . К полюсам показатель снижается до 1 г/м^3 .

По значению абсолютной влажности воздуха трудно сказать, сухой этот воздух или влажный. Чтобы судить о степени влажности воздуха, важно знать, насколько содержащийся в нём пар близок к состоянию насыщения. Для этого вводится понятие относительной влажности воздуха.

При одной и той же температуре давление ненасыщенного пара меньше, чем давление насыщенного пара. Это объясняется тем, что при одних и тех же условиях в ненасыщенном паре меньше молекул воды, чем в насыщенном, а давление пара пропорционально концентрации молекул в нём. Поэтому относительную влажность можно определить как отношение давления водяного пара к давлению насыщенного пара при той же температуре.

Относительной влажностью φ называют отношение давления p водяного пара к давлению p_0 насыщенного пара при той же температуре, выраженное в процентах:

$$\varphi = \frac{p}{p_0} \cdot 100\%. \quad (1)$$

Например, относительная влажность равна 50 %. Это значит, что воздух содержит 50 % того водяного пара, который он может содержать при данной температуре. Считается, что наиболее благоприятная относительная влажность при средних климатических условиях составляет 40–60 %. Отклонение от нормы может вызывать дискомфорт. Так, и жара, и холод гораздо тяжелее переносятся при повышенной влажности воздуха.

Если обозначить величины: давление водяного пара — p , давление насыщенного пара при той же температуре — p_0 , то относительную влажность рассчитывают по формуле

$$\varphi = \frac{p}{p_0} \cdot 100\%.$$

ЗАВИСИМОСТЬ ДАВЛЕНИЯ НАСЫЩЕННОГО ПАРА

ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Модель идеального газа может быть применима для описания ненасыщенного пара. Согласно уравнению $p = nkT$ давление прямо пропорционально температуре: чем выше температура, тем больше давление. Давление же насыщенного пара с увеличением температуры растёт быстрее, чем давление ненасыщенного пара. Это объясняется тем, что с увеличением температуры всё больше молекул покидает жидкость и растёт концентрация молекул насыщенного пара. Основное различие в поведении идеального газа и насыщенного пара заключается в том, что при изменении температуры пара в закрытом сосуде изменяется масса пара.

Если нагревать в закрытом сосуде ненасыщенный пар, то его абсолютная влажность не меняется, а относительная влажность согласно уравнению (1) уменьшается.



ТОЧКА РОСЫ

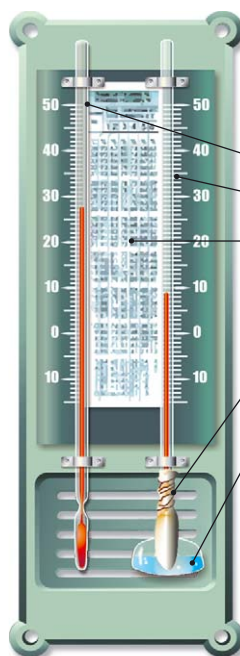
Плотность ρ_0 насыщенного пара при понижении температуры уменьшается. При этом плотность ρ пара, содержащегося во влажном воздухе, практически не изменяется. Поэтому при дальнейшем охлаждении воздуха отношение плотностей ρ/ρ_0 будет возрастать, и при некоторой температуре, называемой **точкой росы**, достигнет значения, равного единице. Это означает, что водяной пар становится насыщенным, выпадает роса и относительная влажность $\varphi = 100\%$.

ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ

Для определения влажности воздуха используют такие приборы, как гигрометр и психрометр.

Гигрометры бывают двух видов — конденсационные и волосные. Их устройство было рассмотрено в 8 классе.

Рассмотрим устройство и принцип действия психрометра. Он состоит из двух термометров. Один из них (сухой) показывает температуру воздуха, а другой (влажный) — температуру ткани, смоченной водой. С поверхности влажной ткани испаряется вода, в результате её температура понижается. Скорость испарения зависит от температуры и относительной влажности воздуха. Чем меньше паров в воздухе, тем интенсивнее идёт процесс испарения и тем ниже температура влажного термометра. С помощью специальной таблицы, называемой психрометрической, по разности показаний сухого и влажного термометров определяют относительную влажность воздуха.



Почему продукты в холодильнике быстро сохнут? Рассмотрим, что происходит с воздухом внутри холодильника, у которого морозильная камера расположена сверху. Охлаждённый возле камеры воздух опускается вниз, нагреваясь при соприкосновении со стенками холодильника и продуктами. При этом уменьшается его относительная влажность, а способность вбирать в себя воду увеличивается. Нагревшись и отобрав часть воды у продуктов, воздух поднимается вверх и снова охлаждается. Но теперь его влажность уже выше первоначальной. Через несколько циклов влажность воздуха настолько возрастает, что около морозильной камеры часть водяных паров конденсируется в виде капелек воды или кристалликов льда.

Сухой термометр

Влажный термометр

Психрометрическая таблица

Ткань

Вода

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

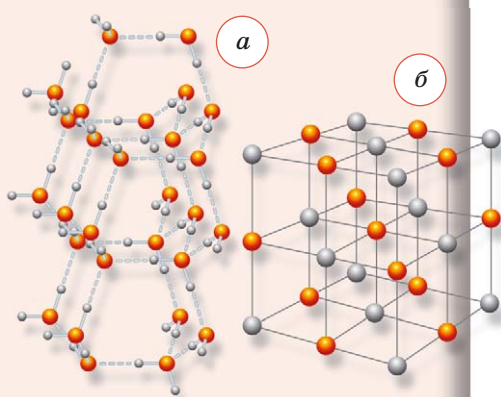
- Что такое относительная влажность воздуха и как её определить?
- Что такое точка росы?
- Объясните принцип действия психрометра.

ВЫ УЗНАЕТЕ:

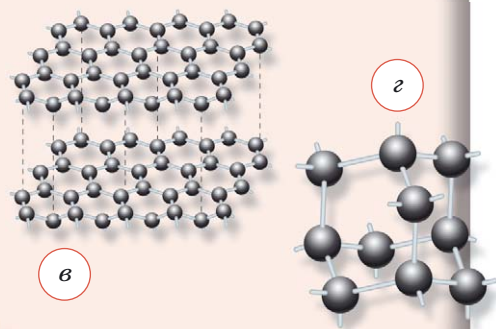
- Что такое монокристаллы и поликристаллы.
- Что такое анизотропия.
- Чем отличаются аморфные тела от кристаллических.

ВСПОМНИТЕ:

- Свойства твёрдого тела с макроскопической и микроскопической точек зрения.



Кристаллы: льда (а)
и поваренной соли (б)



Кристаллы: графита (в)
и алмаза (г)

Различия физических свойств графита и алмаза — кристаллических тел, состоящих из атомов углерода, — обусловлены различным строением их кристаллической решётки.

КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ И АМОРФНЫЕ ТЕЛА

Твёрдое тело, в отличие от жидкостей и газов, сохраняет свою форму и объём. Твёрдые тела могут быть кристаллическими и аморфными.

КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ТЕЛА Кристаллы — это твёрдые тела, атомы или молекулы которых расположены упорядоченно, образуя кристаллическую решётку. Поэтому кристаллы имеют плоские грани. Например, кристаллик льда **а** представляет собой шестиугольную призму, а кристалл поваренной соли **б** имеет форму куба.

В природе существуют тела, представляющие собой один кристалл, например кристаллы природных минералов или крупинки сахарного песка. Такие тела называют **монокристаллами** или просто кристаллами. Кристаллы можно вырастить искусственно.

Большинство кристаллических тел состоит из огромного количества мелких кристалликов, соединённых между собой. Такие тела называют **поликристаллическими**. Примеры поликристаллических тел — кусок любого металла, кусковой сахар, кусок льда и т.п.

Упорядоченное положение атомов (молекул) в кристалле приводит не только к тому, что у кристаллов есть грани, но и к тому, что физические свойства кристаллов различаются в зависимости от направления. Естественно, речь идёт о монокристаллах. Наиболее легко продемонстрировать зависимость механической прочности кристалла от направления. Кристаллы легче всего раскалываются по определённым плоскостям.

Простые карандаши, которыми мы рисуем и пишем, имеют графитовый стержень. Графит состоит из атомов углерода, и его кристаллическая решётка **в** имеет слоистую структуру. Расстояние между слоями существенно больше, чем расстояние между атомами углерода внутри слоя, поэтому силы притяжения между слоями слабее, чем силы притяжения внутри слоя. Когда мы пишем, графитовый стержень касается бумаги, происходит его расслоение, и тонкие слои графита остаются на бумаге, образуя след от графитового стержня.

Многие кристаллы при нагревании расширяются неодинаково в разных направлениях, в зависимости от направления по-разному проводят тепло и электрический ток. От направления зависят также и оптические свойства кристаллов. Зависимость физических свойств кристалла от направления называют **анизотропией**.

Так как поликристаллические тела представляют собой беспорядочные скопления многочисленных мелких кристаллов, то в поликристаллах не наблюдается различий в физических свойствах по разным направлениям. Объясняется это тем, что при движении по любому

выбранному направлению внутри тела можно встретить множество кристалликов, повёрнутых самым различным образом по отношению друг к другу. Поэтому электропроводность, теплопроводность и другие свойства тела являются средней величиной, относящейся ко всем этим многочисленным кристалликам. Это среднее значение одинаково для всех направлений внутри тела.

АМОРФНЫЕ ТЕЛА Аморфные тела — особый вид твёрдых тел, которые по своим физическим свойствам и молекулярной структуре отличаются от кристаллических тел. В аморфных телах атомы или молекулы расположены уже не строго упорядоченно, как в кристаллических телах. В телах, находящихся в аморфном состоянии, нельзя обнаружить даже очень малые области, внутри которых наблюдалась бы зависимость физических свойств от направления. К аморфным телам относятся резина, воск.

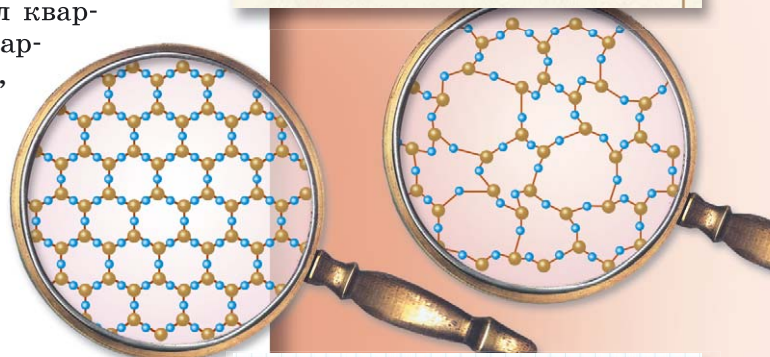
Примером того, что одно и то же вещество может находиться как в кристаллическом, так и в аморфном состоянии, является кварц. Если кристалл кварца расплавить (температура плавления кварца составляет 1700°C), а затем охладить, то при охлаждении образуется плавный кварц, обладающий свойствами, совершенно одинаковыми по всем направлениям и сильно отличающимися от свойств кристаллического кварца.

При внешних воздействиях аморфные тела обладают одновременно упругими свойствами, как твёрдые тела, и текучестью, как жидкости. Пример — смола. От неё можно отколоть кусок, как от твёрдого тела. При этом с течением времени он растекается по поверхности, на которой лежит.

Аморфные тела не обладают кристаллической структурой, поэтому для их плавления не требуется дополнительная энергия для разрыва межмолекулярных связей, как в случае плавления кристаллических тел. Температура аморфных тел при этом изменяется непрерывно. Следовательно, аморфные тела не обладают определённой температурой плавления.

Особое место в природе занимают вирусы, которые были открыты в 1892 г. русским учёным Д.И. Ивановским. Долгое время было непонятно, являются ли вирусы живыми существами, так как вне клетки вирусы неактивны и существуют в кристаллической форме. Но как только вирус проникает в клетку, он становится внутриклеточным паразитом: начинает активно размножаться и поражать другие клетки.

Впервые выделить кристаллы вируса табачной мозаики удалось американскому химику У. Стэнли в 1935 г. Позднее за эту работу он был удостоен Нобелевской премии по химии.



В «Книге всеобщих заблуждений» С. Фрай пишет: «...В течение долгого времени было широко распространено мнение о том, что стекло, будучи аморфным веществом, способно в твёрдом состоянии течь, как жидкость, хотя и очень медленно... Оказывается, причина утолщения нижней части стекла состоит в том, что средневековые стекольщики просто не умели отлить идеальные стеклянные листы, а при установке располагали их толстым краем к полу для большей устойчивости».

ВОПРОСЫ:

- Что такое монокристаллы и поликристаллы?
- Что такое анизотропия?
- Чем аморфные тела отличаются от кристаллических?

ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

● Вещества могут переходить из одного агрегатного состояния в другое. Изменение агрегатного состояния вещества всегда связано с выделением или поглощением некоторого количества теплоты.

● Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называется насыщенным.

● Относительной влажностью называют отношение давления водяного пара к давлению насыщенного пара при той же температуре.

● Температуру, при которой водяной пар, находящийся в воздухе, становится насыщенным, называют точкой росы.

● Кристаллы — это твёрдые тела, атомы или молекулы которых расположены упорядоченно, образуя кристаллическую решётку. Зависимость физических свойств кристалла от направления называют анизотропией.

● Аморфные тела — особый вид твёрдых тел, которые по своим физическим свойствам и молекулярной структуре отличаются от кристаллических тел. Атомы или молекулы аморфных тел расположены не строго упорядоченно. Аморфные тела не имеют определённой температуры плавления.



ПОДРОБНЕЕ...

Перельман Я.И. Занимательная физика. Кн. 2. / Я.И. Перельман. — М.: Римис, 2010.

Перельман Я.И. Знаете ли вы физику? / Я.И. Перельман. — М.: Римис, 2009.

Тит Том. Научные забавы: интересные опыты, самоделки, развлечения. / Том Тит. — М.: ИД Мещерякова, 2010.

Хилькевич С.С. Физика вокруг нас. Вып. 40. / С.С. Хилькевич. — М.: Наука, 1985. — (Библиотечка «Квант»).

ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

- Какой воздух тяжелее: сухой или влажный?
- Может ли рост абсолютной влажности одновременно сопровождаться понижением относительной влажности?
- Кристаллизация вещества происходит с выделением тепла. При этом температура затвердевающего вещества не изменяется. За счёт чего выделяется тепло?

Элементы: Популярный сайт
о фундаментальной науке
<http://gotourl.ru/13728>

Портал журнала
«Наука и жизнь»
<http://gotourl.ru/13729>



ОТ ПАРОВОЙ МАШИНЫ ДО РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ



РАЗДЕЛ III

Знания, которыми обладает человечество, определяют в конечном итоге и уровень жизни нашей цивилизации, и её развитие. Получение огня путём трения, изобретение колеса древними шумерами, применение простых механизмов при строительстве пирамид в Древнем Египте, инженерные изобретения Архимеда и Леонардо да Винчи подтверждают эту мысль. Но это была прелюдия к тому этапу развития человечества, который начался в XVIII в. и который называют промышленной революцией.

Начало бурного развития промышленного производства связано с изобретением ткацкого станка и паровой машины. Паровые машины способствовали развитию горного дела, они приводили в движение металлообрабатывающие станки на фабриках, были изобретены пароход и паровоз. Возникла сеть железных дорог.

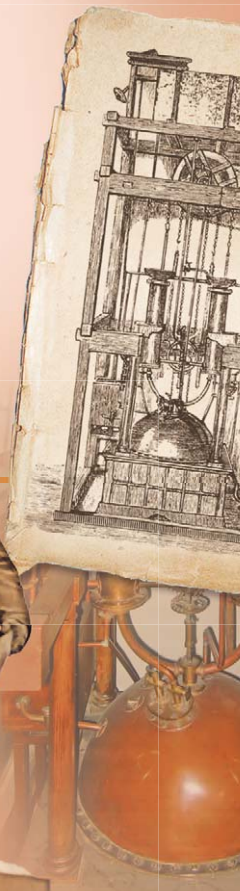
Дальнейший этап развития во второй половине XIX — начале XX в. был связан с открытиями в области электричества и изобретением электродвигателя. Но для использования электричества в быту и промышленности необходимо было создать паровую турбину для тепловых электростанций.

Невозможно представить себе XX век без автомобилей, самолётов, тракторов, а в быту — без холодильников и кондиционеров, т.е. невозможно представить себе нашу жизнь без двигателя внутреннего сгорания и холодильных установок.

Одним из наиболее ярких достижений нашей цивилизации является запуск в XX в. искусственного спутника Земли, полёт человека в космос, полёт человека на Луну, полёт автоматических космических станций к другим планетам. Всё это стало возможным после изобретения реактивного двигателя.

Все эти достижения так или иначе связаны с разделом физики, который называется «Термодинамика», и возникшими на его основе теплотехникой, физикой высоких и низких температур, физикой высоких давлений.

Термодинамика как раздел физики стала развиваться в XVIII в. Параллельно с решением вопросов, связанных с развитием техники, шло развитие термодинамики как важного раздела фундаментальной науки. Рождение термодинамики связывают с выходом небольшой книги молодого французского инженера Сади Карно «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу». Карно предложил новый подход к формулировке задач в термодинамике: «Чтобы рассмотреть принцип получения движения из тепла во всей его полноте, надо его изучить независимо от какого-либо механизма, какого-либо определённого агента, надо провести рассуждения, приложимые не только к паровым машинам, но и ко всем мыслимым тепловым машинам, каково бы ни было вещество, пущенное в дело, и каким бы образом на него ни производилось воздействие».





В это время среди учёных ещё не было общих воззрений на природу теплоты. Одно из представлений о теплоте как форме движения мельчайших частиц материи появилось ещё в XVII в. Этих воззрений придерживались Бэкон, Декарт, Ньютон, Гук, Ломоносов. Другое представление основывалось на теории теплорода — субстанции, объясняющей тепловые явления. Повышение температуры тела связывалось с увеличением количества теплорода, а понижение температуры — с его уменьшением. Решающим экспериментом, подтверждающим первую точку зрения, стал опыт Румфорда. Он обнаружил, что при высверливании канала в пушечном стволе выделяется большое количество тепла. Румфорд провёл ряд экспериментов, убедился в том, что теория теплорода не может объяснить их результаты, и сделал очень важный вывод о том, что теплота — это свойство самого тела, а не что-то добавляемое к нему.



В 1842 г., после ряда экспериментов и исходя из теоретических соображений, Майер высказал предположение о том, что должно существовать прямое количественное соотношение между теплотой и механической энергией. Экспериментально этот факт установил Джоуль в 1843 г. Он доказал, что теплота является формой энергии, и определил меру превращения механической работы в теплоту.

В физику вошло новое понятие — внутренняя энергия тела. Это привело к появлению первого начала термодинамики — закона сохранения энергии. Известный историк науки Дж. Бернал писал: «Закон сохранения энергии объединил много наук и находился в исключительной гармонии с тенденциями времени. Энергия стала универсальной валютой физики — так сказать, золотым стандартом измерений, проходивших во Вселенной. То, что было установлено, представляло собой твёрдый валютный курс для обмена между валютами различных видов энергии: между калориями теплоты, килограмм-метрами работы и киловатт-часами электричества. Вся человеческая деятельность в целом — промышленность, транспорт, освещение и в конечном счёте питание и сама жизнь — рассматривалась с точки зрения зависимости от этого одного общего термина — энергия».

Несмотря на то, что природа теплоты объясняется движением и взаимодействием частиц вещества, термодинамику нельзя свести к чисто механическому движению. Это подтверждается вторым началом термодинамики, которое установило необратимость тепловых процессов.

А. Эйнштейн писал: «Теория производит тем большее впечатление, чем проще её предпосылки, чем разнообразнее предметы, которые она связывает, и чем шире область её применения. Отсюда глубокое впечатление, которое произвела на меня классическая термодинамика. Это единственная физическая теория общего содержания, относительно которой я убеждён, что в рамках применимости её основных понятий она никогда не будет опровергнута...»



Глава 7

ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

- ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ
- КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛОТЫ
- РАБОТА В ТЕРМОДИНАМИКЕ
- ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ
- ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ
- ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ
- РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

РАЗДЕЛ III



ВВЕДЕНИЕ В ТЕРМОДИНАМИКУ

КОРОТКО О ГЛАВНОМ...

То, что теплота заключается в некотором движении малых частиц тела, теперь уже достаточно ясно.

Л. Эйлер

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что изучают в разделе физики «Термодинамика».
- В каких процессах изменяется внутренняя энергия.
- Чему равна внутренняя энергия одноатомного идеального газа.

ВСПОМНИТЕ:

- Основные положения молекулярно-кинетической теории.
- Что такое внутренняя энергия тела?



Никола Леонар Сад Карно
(1796—1832)

Французский физик, один из основателей термодинамики.

Начиная с XVIII в. в физике господствовала теория теплорода — субстанции, объясняющей тепловые явления. Повышение температуры тела связывали с увеличением количества теплорода, а понижение температуры — с его уменьшением. В середине XIX в. теория теплорода была отвергнута.

ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ

В XIX в. существование атомов и молекул ещё оставалось гипотезой, которая опиралась на теоретические построения и не была подтверждена экспериментально. Поэтому в физике исторически возникли два направления изучения тепловых явлений. Одно направление основывалось на достоверных фактах, полученных опытным путём, и получило название «Термодинамика». Другое направление основывалось на атомной гипотезе и получило название «Молекулярная физика».

ТЕРМОДИНАМИКА Термодинамика изучает те же явления, что и молекулярная физика, — тепловые процессы в макроскопических телах. Но эти два раздела физики различаются подходом к изучаемым явлениям и взаимно дополняют друг друга.

Термодинамика, в отличие от молекулярной физики, не вводит никаких специальных гипотез о строении вещества, её выводы основаны на обобщении экспериментальных данных, полученных путём измерения макроскопических параметров тел, таких, как температура, давление, объём и т. д.

Возникновение термодинамики связано с изучением закономерностей превращения теплоты в механическую работу в тепловых двигателях. Основы термодинамики впервые были заложены в небольшой книжке французского инженера и физика Сади Карно «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу», изданной в Париже в 1824 г.

ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ В основе термодинамики лежит понятие внутренней энергии. Согласно молекулярно-кинетической теории **внутренняя энергия — это сумма потенциальной энергии частиц, составляющих тело, и кинетической энергии их беспорядочного теплового движения.** Поскольку количество молекул (атомов), составляющих тело, огромно, вычислить потенциальную и кинетическую энергии каждой молекулы, а затем найти сумму невозможно. Поэтому внутреннюю энергию тела необходимо уметь вычислять, используя макроскопические параметры тела, которые можно измерить непосредственно.

Кинетическая энергия теплового движения частиц зависит от температуры. Потенциальная энергия взаимодействия частиц зависит от расстояний между ними и, следовательно, от объёма. Поэтому в термодинамике внутренняя энергия тела определяется как функция макроскопических параметров, например таких, как температура тела, его объём и др.

ПРОЦЕССЫ, ПРИ КОТОРЫХ ИЗМЕНЯЕТСЯ ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ

Так как внутренняя энергия зависит от температуры, при изменении температуры внутренняя энергия также изменяется. Вы уже знаете, что с изменением темпера-

туры изменяется и кинетическая энергия молекул. С изменением температуры в жидкостях и твёрдых телах изменяется не только средняя скорость, но и взаимное расположение молекул (атомов) и, следовательно, изменяется их потенциальная энергия.

Внутренняя энергия изменяется при переходе вещества из одного агрегатного состояния в другое, так как при таком переходе изменяется взаимное расположение молекул. Причиной изменения внутренней энергии может служить также химическая реакция. При такой реакции атомы и молекулы перегруппировываются, что вызывает изменение их потенциальной и кинетической энергий.



ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ ИДЕАЛЬНОГО ОДНОАТОМНОГО ГАЗА

Вычислим внутреннюю энергию идеального одноатомного газа, т.е. газа, состоящего не из молекул, а из отдельных атомов. В модели идеального газа предполагается, что молекулы не взаимодействуют между собой. Следовательно, их потенциальная энергия равна нулю. Тогда внутренняя энергия идеального газа равна сумме кинетических энергий теплового движения всех его молекул:

$$U = NE.$$

С учётом того что количество молекул $N = \nu N_A$, энергия одной молекулы $E = \frac{3}{2}kT$, а $kN_A = R$:

$$U = NE = \nu N_A \frac{3}{2}kT = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT. \quad (1)$$

Внутренняя энергия идеального одноатомного газа прямо пропорциональна его абсолютной температуре. Изменение внутренней энергии равно:

$$\Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R(T_2 - T_1).$$

Используя уравнение Менделеева–Клапейрона, с учётом уравнения (1) получаем ещё одно уравнение для внутренней энергии идеального одноатомного газа:

$$U = \frac{3}{2} pV. \quad (2)$$

СПОСОБЫ ИЗМЕНЕНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ЭНЕРГИИ

Внутреннюю энергию можно изменить двумя способами: посредством *совершения работы* и посредством *теплопередачи*.

При работе, совершённой против сил трения, трущиеся поверхности нагреваются. Так, если потереть одну ладонь о другую, кожа нагреется. Увеличить внутреннюю энергию тела можно путём деформации. Если несколько раз ударить молотком по свинцовому шарик, он деформируется и заметно нагреется. Совершённая при этом работа приведёт к изменению взаимного расположения атомов свинца и к изменению характера их движения. Процесс передачи энергии от более нагретого тела или участков тела к менее нагретым без совершения работы называют теплопередачей или теплообменом. При этом внутренняя энергия тела с более высокой температурой уменьшается, а внутренняя энергия тела с более низкой температурой увеличивается.

Различают три вида теплопередачи. **Теплопроводность a** — это передача теплоты от одной части тела к другой или от одного тела к другому при их непосредственном контакте. **Конвекция b** — это передача теплоты путём взаимного перемещения тёплых и холодных слоёв жидкости и газа. **Излучение v** — это передача теплоты с помощью электромагнитных волн.

ВОПРОСЫ:

- Что изучает термодинамика?
- При каких процессах изменяется внутренняя энергия?



ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое удельная теплоёмкость.
- Что такое удельная теплота плавления.
- Что такое удельная теплота парообразования.
- Что такое удельная теплота сгорания.

ВСПОМНИТЕ:

- Виды теплообмена.
- Процессы перехода вещества из одного агрегатного состояния в другое.

Когда тело нагревается путём теплопередачи, его внутренняя энергия увеличивается. Но при нагревании тела расширяются, следовательно, совершается работа против сил, препятствующих расширению. Эти силы представляют собой как силы внешнего давления, так и силы молекулярного притяжения. Эти силы достаточно значительны для твёрдых тел и жидкостей и малы для газов. В случае твёрдых тел расширение всегда ничтожно мало и им можно пренебречь. Для газов, заключённых в сосуд, расширение отсутствует. Если же газ нагревать при постоянном давлении, то он будет расширяться и совершать работу. Поэтому для его нагревания на 1°C потребуется больше теплоты, чем при нагревании при постоянном объёме. Следовательно, удельная теплоёмкость зависит не только от свойств вещества, но и от процесса, при котором происходит теплопередача.

КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛОТЫ

Согласно молекулярно-кинетической теории температура является мерой средней кинетической энергии отдельных молекул тела. Внутренняя энергия тела — это полная энергия всех молекул тела. Для количественной характеристики изменения внутренней энергии при теплообмене в физике вводят понятие количества теплоты.

КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛОТЫ Энергию, которую получает или отдаёт тело при теплопередаче (без совершения работы), называют **количеством теплоты** (Q).

Количество теплоты, необходимое для нагревания тела (или выделяемое при остывании), зависит от массы этого тела, изменения его температуры и рода вещества. Чем больше масса тела, тем большее количество теплоты надо затратить, чтобы изменить его температуру на одно и то же значение. Количество теплоты, которое необходимо для нагревания данного тела, тем больше, чем больше разность температур тела до и после нагревания. Чтобы изменить на одно и то же значение температуры тел одинаковой массы, но состоящих из разных веществ, требуется разное количество теплоты.

Единицей количества теплоты является та же единица, что и для других видов энергии, — *джоуль* (Дж). Существует и другая (внесистемная) единица количества теплоты — *калория* (кал). Одна калория равна количеству теплоты, которое необходимо для нагревания 1 г воды на 1°C . Соотношение между джоулем и калорией следующее: $1\text{ кал} \approx 4,19\text{ Дж}$.

На практике обычно используют в тысячу раз большую единицу — *килокалорию* (ккал). Часто вместо слова «килокалория» пишут «Калория» с большой буквы.

КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛОТЫ И УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОЁМКОСТЬ Количество теплоты, необходимое для нагревания тела (или выделяемое при остывании), рассчитывают по формуле

$$Q = cm(t_2 - t_1) = cm\Delta t, \quad (1)$$

где c — удельная теплоёмкость вещества.

Из уравнения (1) получаем

$$c = \frac{Q}{m\Delta t}. \quad (2)$$

Удельная теплоёмкость — это величина, численно равная количеству теплоты, которое получает или отдаёт вещество массой 1 кг при изменении его температуры на 1 К . Удельная теплоёмкость одного и того же вещества может быть постоянной в широком интервале температур. Однако удельная теплоёмкость вещества, находящегося в различных агрегатных состояниях, разная.

УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОТА ПЛАВЛЕНИЯ Для того чтобы разрушить кристаллическую решётку различных веществ, необходимо затратить разную энергию и, следовательно,

передать веществу разное количество теплоты. Физическую величину, показывающую, какое количество теплоты необходимо передать кристаллическому телу массой 1 кг, чтобы при температуре плавления полностью перевести его в жидкое состояние, называют **удельной теплотой плавления**.

Количество теплоты Q , необходимое для плавления кристаллического тела массой m , взятого при температуре плавления и нормальном атмосферном давлении, зависит как от удельной теплоты плавления λ , так и от массы вещества:

$$Q = \lambda m. \quad (3)$$

Удельная теплота плавления равна изменению внутренней энергии вещества массой 1 кг, взятого при температуре плавления, при его плавлении или отвердевании. Таким образом, при температуре плавления внутренняя энергия вещества в жидком состоянии больше внутренней энергии такой же массы вещества в твёрдом состоянии.

При плавлении кристаллического тела увеличивается только потенциальная энергия его молекул. Так как плавление происходит при постоянной температуре, средняя кинетическая энергия молекул не изменяется.

УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОТА ПАРООБРАЗОВАНИЯ Количество теплоты, необходимое для превращения жидкости в пар при температуре кипения, зависит от рода жидкости и пропорционально массе жидкости:

$$Q = rm, \quad (4)$$

где r — удельная теплота парообразования.

Удельная теплота парообразования показывает, насколько увеличивается внутренняя энергия вещества массой 1 кг при переходе из жидкого состояния в газообразное при температуре кипения. При температуре кипения внутренняя энергия вещества в парообразном состоянии больше внутренней энергии такой же массы вещества в жидком состоянии. Энергия, необходимая для перехода вещества из жидкого состояния в газообразное, значительно превышает энергию, необходимую для нагревания этого вещества до температуры кипения, или энергию, необходимую для плавления этого вещества.

УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОТА СГОРАНИЯ Величину, равную количеству теплоты, выделившемуся при сгорании 1 кг вещества, называют **удельной теплотой сгорания**:

$$q = \frac{Q}{m}. \quad (5)$$

Пример процессов нагревания и последовательности перехода из одного агрегатного состояния в другое для 1 кг льда, взятого при $t = -20^\circ\text{C}$.



Если обозначить величины: удельная теплоёмкость — c , масса тела — m , начальная и конечная температуры тела — t_1 и t_2 , то количество теплоты, необходимое для нагревания тела (или выделяемое при остывании), рассчитывают по формуле

$$Q = cm(t_2 - t_1).$$

Если обозначить величины: количество теплоты — Q , масса — m и удельная теплота плавления — λ , то количество теплоты, необходимое для плавления кристаллического тела при температуре плавления, рассчитывают по формуле

$$Q = \lambda m.$$

По этой же формуле определяется количество теплоты, выделяющееся при кристаллизации тела массой m .

Если обозначить величины: количество теплоты — Q , масса — m и удельная теплота парообразования — r , то количество теплоты, необходимое для превращения жидкости в пар при температуре кипения, рассчитывают по формуле

$$Q = rm.$$

ВОПРОСЫ:

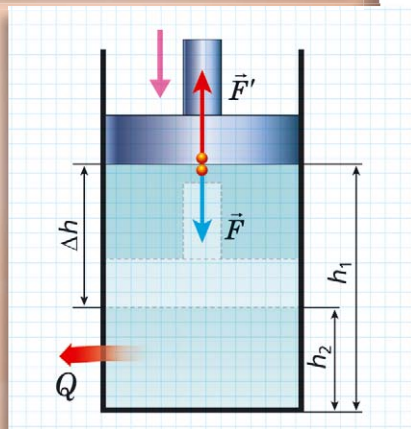
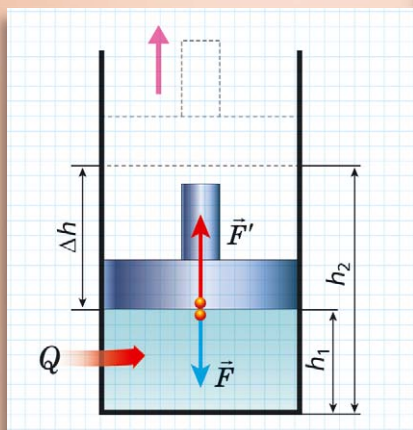
- Что такое удельная теплоёмкость?
- Что такое удельная теплота плавления? удельная теплота парообразования?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что означает понятие работы в термодинамике.
- Как вычислить работу газа при изобарном процессе.
- Геометрическое истолкование работы газа.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое механическая работа?
- Что такое изобарный, изохорный и изотермический процессы?



Если обозначить величины: давление газа — p , начальный и конечный объёмы газа соответственно — V_1 и V_2 , изменение объёма газа — ΔV , то работу при изобарном изменении объёма газа рассчитывают по формуле

$$A' = p(V_2 - V_1) = p\Delta V.$$

РАБОТА В ТЕРМОДИНАМИКЕ

В механике работа связана с силой и перемещением тела и совершаемая работа является мерой изменения энергии тела. Что означает термин «работа» в термодинамике?

РАБОТА В ТЕРМОДИНАМИКЕ Вы уже знаете, что одним из способов изменения внутренней энергии тела является работа. Если работа совершается над телом, то его внутренняя энергия увеличивается; если же тело само совершает работу, это ведёт к уменьшению его внутренней энергии. При этом в термодинамике движение макроскопического тела как целого не рассматривается. Понятие работы здесь связывается с изменением объёма тела, т.е. с перемещением частей макротела друг относительно друга. Этот процесс приводит к изменению расстояния между частицами, из которых состоит тело, а также к изменению скоростей их движения. Поэтому работа в термодинамике приводит к изменению внутренней энергии тела.

РАБОТА ГАЗА ПРИ ИЗОБАРНОМ ПРОЦЕССЕ Пусть в цилиндре с подвижным поршнем находится газ. Рассмотрим процесс нагревания газа, при котором он расширяется изобарно, т.е. давление, оказываемое газом на поршень, постоянно. Такое предположение может быть справедливо, если процесс осуществляется медленно и смещение поршня $\Delta h = h_2 - h_1$ мало по сравнению с величинами h_1 и h_2 .

Обозначим силу давления поршня на газ $\vec{F}$, а силу давления газа на поршень $\vec{F}'$. По третьему закону Ньютона $\vec{F} = -\vec{F}'$. Модуль силы, действующей со стороны газа на поршень, равен: $F' = pS$, где p — давление газа; S — площадь поверхности поршня.

Так как давление газа постоянно, работа газа равна:

$$A' = F'\Delta h = pS(h_2 - h_1) = p(Sh_2 - Sh_1). \quad (1)$$

Работу газа можно выразить через изменение объёма газа. Обозначим начальный и конечный объёмы газа соответственно V_1 и V_2 . Тогда $V_1 = Sh_1$, а $V_2 = Sh_2$. С учётом формулы (1) получаем

$$A' = p(V_2 - V_1) = p\Delta V, \quad (2)$$

где ΔV — изменение объёма газа.

Так как направление силы $\vec{F}'$ и направление перемещения поршня совпадают, работа газа положительна, а работа внешней силы $\vec{F} = -\vec{F}'$ отрицательна:

$$A = -A' = -p\Delta V. \quad (3)$$

Если же газ сжимается, то $V_2 < V_1$ и $\Delta V < 0$, поэтому по формуле (2) $A' < 0$, т.е. при сжатии газа его работа отрицательна, а работа силы, действующей со стороны поршня на газ, положительна.

Если в процессе расширения газ не нагревать и не поддерживать давление постоянным, то внутренняя энергия газа будет уменьшаться — он отдаёт энергию поршню, стенкам сосуда. Температура газа при таком

процессе уменьшается. При сжатии газ получает энергию от поршня, поэтому для сохранения давления неизменным газ нужно охлаждать.

При изохорном процессе работа газом не совершается, так как $\Delta V = 0$ и, следовательно, $A' = 0$.

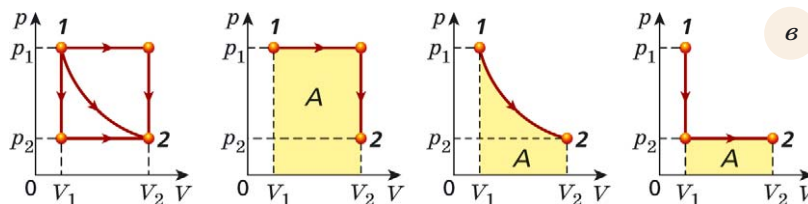
ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ ИСТОЛКОВАНИЕ РАБОТЫ ГАЗА Построим график зависимости давления газа от его объёма при изобарном процессе **а**. При изменении объёма газа от V_1 до V_2 силой давления газа совершается работа

$$A' = p(V_2 - V_1) = p\Delta V.$$

Из графика видно, что эта работа численно равна площади закрашенного прямоугольника.

Рассмотрим график зависимости давления газа от его объёма при изотермическом процессе **б**. В этом случае при расширении газа давление убывает обратно пропорционально объёму. Для вычисления работы разделим общее изменение объёма на малые составляющие ΔV , вычислим работу $\Delta A' = p\Delta V$, а затем сложим все полученные значения. Работа газа и в этом случае будет численно равна площади фигуры, ограниченной графиком зависимости p от V , осью абсцисс и отрезками, равными давлениям p_1 и p_2 в начальном и конечном состояниях газа.

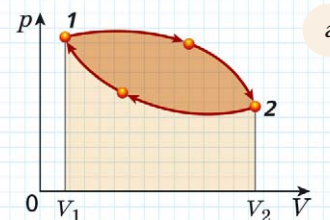
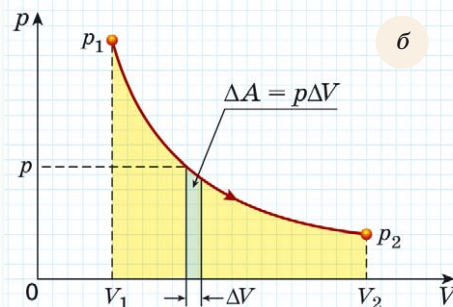
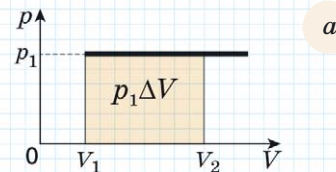
Пусть газ перешёл из состояния 1 в состояние 2. На рисунке **в** изображены три варианта процессов, соответствующих этому переходу. Видно, что работа зависит от того, каким путём совершался переход из начального состояния в конечное. В этих трёх случаях газ совершал различную работу, но во всех случаях работа численно равна площади фигуры, ограниченной графиком и осью абсцисс.



Для газов возможен и обратный процесс — переход из состояния 2 в состояние 1. Тогда для изображенных процессов надо поменять направления стрелок **г**. В этом случае работа A просто изменит знак на противоположный.



Опыт Дж.П. Джоуля (1843) по определению механического эквивалента тепла показал, что внутренняя энергия жидких и твёрдых тел также может изменяться в результате совершения работы. Джоуль нагревал воду с помощью лопастей, которые вращались под действием грузов. При вращении вертушки, погружённой в жидкость, внешние силы совершают положительную работу, при этом жидкость из-за наличия сил внутреннего трения нагревается, т.е. увеличивается её внутренняя энергия.



Если газ возвращается к своему начальному состоянию, то говорят, что он совершил циклический процесс. И в этом случае работа газа численно равна площади фигуры, заключённой внутри цикла в координатах зависимости p от V .

ВОПРОСЫ:

- Как вычислить работу газа при изобарном процессе?
- Каково геометрическое истолкование работы газа?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Первый закон термодинамики.
- Примеры применения первого закона термодинамики.

ВСПОМНИТЕ:

- Закон сохранения энергии.
- Изопроцессы.



Юлиус Роберт Майер
(1814—1878)

Немецкий учёный, первым сформулировавший закон сохранения энергии.

ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Говоря о способах изменения внутренней энергии тела, мы отдельно обсуждали теплообмен и работу. А как изменится внутренняя энергия, если одновременно происходит теплообмен и совершается работа?

ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ В общем случае при переходе тела из одного состояния в другое внутренняя энергия изменяется как за счёт теплообмена, так и за счёт совершения работы.

Первый закон термодинамики формулируется следующим образом: **изменение внутренней энергии системы при переходе её из одного состояния в другое равно сумме работы внешних сил и количества теплоты, переданного системе:**

$$\Delta U = A + Q. \quad (1)$$

Передача в систему некоторого количества теплоты Q и совершение работы A являются способами передачи энергии в систему или из неё, поэтому **первый закон термодинамики — это закон сохранения энергии для тепловых процессов.**

Важно отметить, что закон сохранения энергии был сформулирован только в середине XIX в., поскольку до этого ещё не было сформировано представление о теплоте как способе передачи энергии.



К открытию закона сохранения энергии привёл совместный труд многих учёных.

Начало установления количественной связи между работой и теплотой связано с именем французского учёного Сади Карно, прожившего всего 36 лет. О его научной деятельности, которую он совмещал с военной службой, известно очень мало. В записной книжке, обнаруженной после смерти Карно в 1878 г., было написано: «Тепло может быть колебательным движением частиц. Если это так, то количество тепла есть не что иное, как механическая энергия, затраченная на приведение частиц в колебательное движение... Таким образом, можно сформулировать общий принцип, согласно которому количество движущей силы в природе неизменно; точнее говоря, она не создаётся и не исчезает». Но основными творцами закона сохранения энергии считаются трое учёных: немецкий врач Ю. Майер, английский физик Д. Джоуль и немецкий естествоиспытатель Г. Гельмгольц.

Майер первым (1842) сформулировал закон, однако все его рассуждения выглядели как философские обобщения, поэтому большинство исследо-

вателей не обратили на них внимания. Джоуль же опирался только на опыт и общую идею: основные силы природы неуничтожаемы, и повсюду, где сила затрачивается, возникает соответствующее ей количество теплоты. Гельмгольц поставил перед собой фундаментальную задачу: свести все явления природы к движению отдельных материальных точек, действующих друг на друга с притягивающими или отталкивающими силами, зависящими от расстояний между ними. Более того, ему удалось выразить это математически.

Примечательно, что Гельмгольц писал: «Хотя никто... не станет отрицать, что Джоуль сделал гораздо больше Майера и что в первых работах Майера многие частности неясны, но я всё-таки полагаю, что на Майера следует смотреть как на человека, который независимо и самостоятельно пришёл к этой мысли, обусловившей величайший современный прогресс естественных наук. Заслуга его не становится меньше оттого, что одновременно с ним другой учёный, в другой стране и на другом поприще, сделал то же самое открытие и впоследствии развил его даже лучше, чем он».

Часто первый закон термодинамики формулируют с использованием работы A' , совершённой самой системой. Поскольку $A = -A'$, можно записать:

$$Q = \Delta U + A'. \quad (2)$$

Количество теплоты, переданное системе, идёт на изменение её внутренней энергии и на совершение системой работы над внешними телами.

ИЗОХОРНЫЙ ПРОЦЕСС При изохорном процессе работа газом не совершается, так как $\Delta V = 0$ и, следовательно, $A' = 0$. Согласно уравнению (2)

$$\Delta U = Q. \quad (3)$$

При изохорном процессе внутренняя энергия изменяется только посредством теплопередачи.

Если газ нагревается, то $Q > 0$ и $\Delta U > 0$ — внутренняя энергия увеличивается. Если газ охлаждается, то $Q < 0$ и $\Delta U < 0$ — внутренняя энергия уменьшается.

ИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС Так как внутренняя энергия зависит только от температуры, то при изотермическом процессе она не изменяется: $\Delta U = 0$. Согласно уравнению (2)

$$Q = A'. \quad (4)$$

При изотермическом процессе всё переданное газу количество теплоты идёт на совершение работы.

Если газу передаётся количество теплоты ($Q > 0$), то $A' > 0$ — газ совершает положительную работу. Если же от газа отводится некоторое количество теплоты ($Q < 0$), то $A' < 0$ — газ совершает отрицательную работу, а работа внешних сил оказывается положительной.

ИЗОБАРНЫЙ ПРОЦЕСС При изобарном процессе $A' = p\Delta V$, следовательно, согласно уравнению (2)

$$Q = \Delta U + p\Delta V. \quad (5)$$

АДИАБАТНЫЙ ПРОЦЕСС Системы, которые не обмениваются теплом с окружающими телами, называют **изолированными**. Процессы в изолированной системе называют **адиабатными**. При адиабатном процессе $Q = 0$ и согласно уравнению (1)

$$\Delta U = A. \quad (6)$$

При адиабатном процессе внутренняя энергия изменяется только за счёт совершённой работы.

УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА Пусть изолированная система состоит из нескольких тел с разными температурами. Если никакой работы в системе не совершается, то для каждого тела $\Delta U_i = Q_i$. Так как система изолированная, то $\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 + \dots = 0$. Отсюда получаем **уравнение теплового баланса**

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots = 0, \quad (7)$$

где Q_1, Q_2, Q_3 — количества теплоты, полученные или отданные телами.

Если обозначить величины: изменение внутренней энергии системы — ΔU , количество теплоты, переданное системе, — Q , работа внешних сил — A , работа системы над внешними телами — A' , то первый закон термодинамики можно записать так:

$$\Delta U = A + Q, \text{ или } Q = \Delta U + A'.$$

Реальную систему можно считать изолированной, если она заключена в оболочку с очень низкой теплопроводностью или если все процессы в ней происходят так быстро, что практически отсутствует теплообмен между системой и окружающими её телами.

Примером адиабатного процесса является образование облаков. Нагретый у поверхности Земли воздух поднимается вверх и расширяется, совершая работу против сил атмосферного давления. Это расширение воздуха сопровождается его существенным охлаждением. При охлаждении находящийся в воздухе водяной пар конденсируется, превращаясь в мельчайшие капельки воды — облака.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Сформулируйте первый закон термодинамики.
- Как можно использовать первый закон термодинамики при анализе изопроцессов?
- Какой процесс называется адиабатным?
- Объясните уравнение теплового баланса.

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое необратимость физических процессов.
- Второй закон термодинамики.

ВСПОМНИТЕ:

- Первый закон термодинамики.

ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Первый закон термодинамики сыграл такую важную роль в развитии физики, что его часто называют первым началом термодинамики. Но через несколько лет после его открытия был сформулирован настолько же важный второй закон термодинамики — второе начало термодинамики. В середине XIX в. два начала термодинамики произвели революцию в физике.

НЕОБРАТИМОСТЬ ПРОЦЕССОВ В ПРИРОДЕ

Согласно первому закону термодинамики энергия сохраняется, однако этот закон не даёт никаких объяснений о том, в каком направлении могут происходить процессы. Поставим на холодную металлическую подставку горячую кастрюлю. Постепенно кастрюля отдаст часть своего тепла подставке, при этом подставка нагреется, а кастрюля остынет. Обратный процесс, при котором холодная подставка отдаст часть своего тепла горячей кастрюле, вполне допустим согласно закону сохранения энергии, но в реальности невозможен. Если кусочек льда опустить в стакан с тёплой водой, лёд постепенно растает, а вода остынет. Этот процесс также необратим. Приведём ещё один пример. Мы уже неоднократно обсуждали превращения энергии для камня, падающего с некоторой высоты на поверхность Земли. Сначала его потенциальная энергия превращается в кинетическую, а потом кинетическая энергия переходит во внутреннюю энергию самого камня и Земли. Этот процесс необратим, поскольку внутренняя энергия камня и Земли не может самопроизвольно превратиться в кинетическую энергию, иначе камень взлетел бы вверх.

Все макроскопические процессы в природе протекают только в одном определённом направлении. Это относится не только к физическим, но и к биологическим процессам, таким, как рождение и взросление. Именно необратимость процессов и объясняет второй закон термодинамики.

Процесс называют **обратимым**, если он может происходить как в прямом, так и в обратном направлении. Процесс называют **необратимым**, если он может протекать только в одном определённом направлении.

ФОРМУЛИРОВКИ ВТОРОГО ЗАКОНА ТЕРМОДИНАМИКИ

Второй закон термодинамики позволяет судить о направлении макропроцессов, которые могут происходить в окружающем нас мире. Исторически сложилось так, что существует несколько формулировок этого закона, данных разными учёными в разное время. Все эти формулировки, несмотря на внешнюю несхожесть, выражают одну и ту же закономерность и потому эквивалентны.

Основоположником второго начала термодинамики считают С. Карно. Однако при написании своего труда он придерживался теории теплорода, поэтому не смог дать

Движущая сила водопада зависит от его высоты и количества жидкости; движущая сила тепла также зависит от количества используемого тепла и от того, что может быть названо высотой её падения, т.е. от разности температур тел, которые обмениваются теплом. В водопаде движущая сила в точности пропорциональна разности высокого и низкого уровней в резервуарах. В потоке теплоты движущая сила, несомненно, растёт с увеличением разности температур между горячим и холодным телами.

С. Карно

чёткой формулировки этого закона. Точные формулировки появились спустя более 25 лет в работах немецкого физика Р.Клаузиуса и шотландского физика У.Кельвина.

Второй закон термодинамики Клаузиус формулирует следующим образом: «Теплота не может переходить сама собой от более холодного тела к более тёплому». Учёный в своих статьях разъяснял смысл выражения «сама собой». Он считал, что теплопередача возможна только по направлению от горячей системы к холодной, если отсутствуют другие одновременные изменения в этих системах или в окружающих телах. Теплопередача от холодного тела к более тёплому, например в холодильнике, возможна только с изменениями в окружающих телах — охлаждение достигается за счёт совершения работы.

Согласно формулировке второго закона термодинамики Кельвина невозможен периодический процесс, единственным результатом которого было бы производство работы за счёт уменьшения внутренней энергии теплового резервуара.

Огромное значение второго закона термодинамики заключается в том, что из этого закона следует не только необратимость тепловых процессов, но и необратимость многих других процессов в природе. Хотя ещё раз необходимо подчеркнуть, что во втором законе термодинамики речь идёт о макропроцессах. Применять этот закон к процессам микромира нельзя!

Игрушка «пьющий утёнок» не может рассматриваться в качестве вечного двигателя второго рода, поскольку после испарения жидкости в сосуде работа игрушки прекращается.



Клаузиус показал, что невозможен процесс, при котором теплота переходила бы самопроизвольно от тел более холодных к телам более нагретым. При этом невозможен не только самопроизвольный переход — его невозможно осуществить и с помощью технических устройств без того, чтобы в окружающей среде не произошло ещё каких-либо изменений.

У.Томсон (лорд Кельвин) сформулировал принцип невозможности вечного двигателя второго рода, поскольку в природе невозможны процессы, единственным следствием которых была бы механическая работа, произведённая за счёт охлаждения теплового резервуара.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Какие процессы называют необратимыми?
- Сформулируйте второй закон термодинамики.

ВЕЧНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ВТОРОГО РОДА И НЕВОЗМОЖНОСТЬ ИХ СОЗДАНИЯ

Механизм, безостановочно двигающий себя и совершающий какую-либо полезную работу, например поднимающий груз, является вечным двигателем. Первые проекты вечного двигателя относят к XIII в. К концу XVIII в. укрепились убеждения в невозможности создания вечного двигателя, и с 1775 г. Французская академия наук отказалась рассматривать подобные проекты. В середине XIX в., с установлением закона сохранения энергии, была доказана неосуществимость этой идеи.

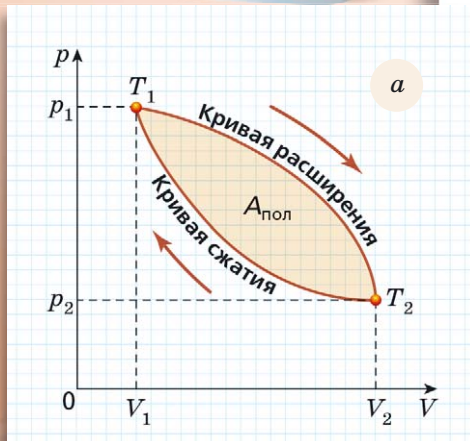
Вечные двигатели, принцип работы которых противоречил первому началу термодинамики (закону сохранения энергии), называют **вечными двигателями первого рода**. Существовала и другая идея вечного двигателя, которая не противоречила закону сохранения энергии. Было известно, что работа в двигателях совершается, когда горячее тело отдаёт тепло газу или пару и пар совершает работу, например двигая поршень. Принцип действия **вечного двигателя второго рода** основан на полном преобразовании теплоты в работу. Идея такого источника энергии заключается в использовании внутренней энергии, содержащейся в воздухе, воде, почве и т.д., для совершения механической работы. Возможность функционирования вечного двигателя второго рода не противоречит первому началу термодинамики, но запрещается вторым началом термодинамики.

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое тепловой двигатель.
- Что такое коэффициент полезного действия теплового двигателя.
- Что такое цикл Карно.

ВСПОМНИТЕ:

- Первый закон термодинамики.
- Второй закон термодинамики.



На рисунке *a* для каждого значения V температура при расширении больше, чем при сжатии, поэтому кривая расширения лежит выше кривой сжатия.

При этом полезная работа численно равна площади заштрихованной на графике фигуры.

Термодинамика как раздел физики возникла в первую очередь из-за необходимости изучения и описания работы тепловых машин. С. Карно писал: «...Природа, повсюду предоставляя горючий материал, дала нам возможность всегда и везде получать теплоту и сопровождающую её движущую силу. Развивать эту силу и приспособлять её для наших нужд — такова цель тепловых машин».

ТЕПЛОВОЙ ДВИГАТЕЛЬ Любое устройство, которое преобразует тепловую энергию топлива в механическую работу, называют **тепловым двигателем**. Первые тепловые двигатели были созданы Л.Т. Севери Т. Ньютоном, И. Ползуновым и усовершенствованы Д. Уаттом в XVIII в.

Для того чтобы внутренняя энергия превратилась в механическую, энергия, выделяющаяся при сгорании топлива, должна передаваться путём теплообмена какому-либо газу. Газ, называемый **рабочим телом**, расширяется и совершает работу против внешних сил. Устройство, за счёт которого рабочее тело нагревается, называют **нагревателем**. Любой двигатель имеет конечный размер, и газ не может расширяться до бесконечности. Для постоянной работы теплового двигателя необходимо, чтобы после расширения газ был сжат до первоначального состояния и все части двигателя вернулись в исходное положение. После этого вновь могут происходить процессы расширения и сжатия газа, т.е. работа теплового двигателя состоит из периодически повторяющихся процессов (циклов) расширения и сжатия.

Полная механическая работа A теплового двигателя в течение цикла складывается из работы газа в процессах его расширения $A_{\text{расш}}$ и сжатия $A_{\text{сж}}$. Так как изменение объёма газа при сжатии $\Delta V < 0$, то работа, совершаемая силами давления газа при его сжатии, отрицательна:

$$A_{\text{сж}} = -|A_{\text{сж}}| < 0.$$

Поэтому

$$A = A_{\text{расш}} - |A_{\text{сж}}|.$$

Следовательно, для того чтобы двигатель совершал полезную работу, необходимо, чтобы работа в процессе расширения была больше работы при сжатии. Это возможно только тогда, когда давление газа при его расширении больше, чем давление газа при его сжатии. Так как при фиксированном объёме давление тем меньше, чем ниже температура, то перед сжатием газ необходимо охладить.

Следовательно, необходим **холодильник**, которому рабочее тело отдаёт некоторое количество теплоты. Роль холодильника может выполнять и окружающий воздух. Без холодильника невозможно получить положительную полезную работу теплового двигателя.

Рабочее тело, получая некоторое количество теплоты Q_1 от нагревателя, часть этого количества теплоты, по модулю равную $|Q_2|$, отдаёт холодильнику. Поэтому совершаемая работа не может быть больше $A = Q_1 - |Q_2|$.

КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОВОГО

ДВИГАТЕЛЯ

При сгорании топлива в двигателе только часть энергии идёт на совершение полезной работы. Чем меньше энергии теряется, тем экономичнее тепловой двигатель. Для характеристики экономичности различных двигателей вводится понятие коэффициента полезного действия двигателя — КПД (безразмерный или в %). Отношение полезной работы, совершённой двигателем, к энергии, полученной от нагревателя, называют **коэффициентом полезного действия теплового двигателя**:

$$\eta = \frac{A_n}{Q_1} \cdot 100\%, \text{ или } \eta = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} \cdot 100\%. \quad (1)$$

Можно записать:

$$\eta = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}.$$

Таким образом, *коэффициент полезного действия теплового двигателя всегда меньше единицы (меньше 100%)*.

ЦИКЛ КАРНО

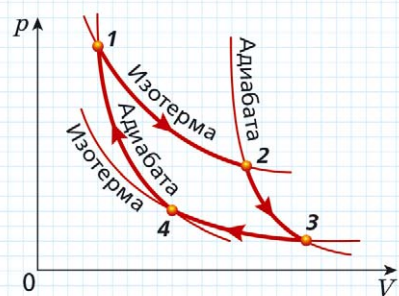
Проводя свои исследования, С. Карно описал идеализированную тепловую машину с идеальным газом в качестве рабочего тела. Сейчас такой тепловой двигатель называют двигателем Карно. В начале цикла рабочее тело и нагреватель имеют одинаковую температуру T_1 (точка 1 на графике). Получая от нагревателя количество теплоты Q_1 , газ изотермически расширяется и приходит в состояние 2. Затем газ расширяется адиабатно до состояния 3, при этом его температура понижается до T_2 — температуры холодильника. После этого под действием внешних сил газ изотермически сжимается до состояния 4, отдавая при этом холодильнику количество теплоты Q_2 . И наконец, газ сжимается адиабатно до состояния 1, при этом его температура повышается и опять становится равной T_1 .

Цикл Карно является идеализацией реальных процессов, поскольку в нём нет потерь энергии за счёт теплообмена с окружающей средой, не учитывается трение, а все процессы обратимы. Таким образом, двигатель Карно является самым эффективным из всех возможных тепловых двигателей и имеет максимальный КПД, который рассчитывают по формуле

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (2)$$

Формула (2) показывает, что КПД теплового двигателя имеет предельное максимальное значение, и никакая реальная тепловая машина, нагреватель и холодильник которой имеют температуры T_1 и T_2 соответственно, не может иметь КПД, превышающий значение, полученное по формуле (2). Из формулы (2) следует, что чем меньше отношение T_2/T_1 , тем эффективнее работает тепловой двигатель. Максимальный КПД, равный единице, мог бы иметь тепловой двигатель, у которого температура холодильника была бы равна абсолютному нулю.

Идеальный тепловой двигатель — двигатель Карно — был придуман как мысленный эксперимент. Двигатель Карно сыграл огромную роль в истории науки, так как с его помощью удалось объяснить принцип действия любых тепловых двигателей, а также внести существенный вклад в понимание второго начала термодинамики.



$$\eta = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

1-2

изотермическое
расширение при
температуре T_1



2-3

адиабатное
расширение
 $Q = 0$



3-4

изотермическое
сжатие при
температуре T_2



4-1
адиабатное
сжатие
 $Q = 0$

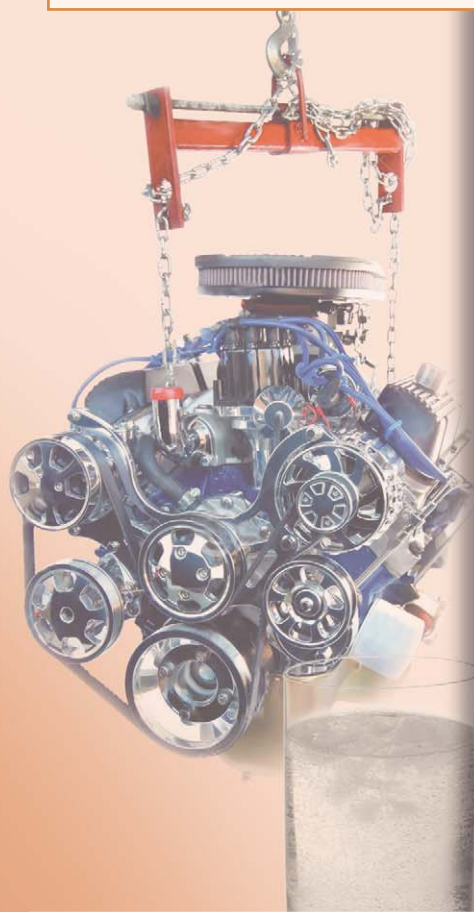
ВОПРОСЫ:

- Что такое тепловой двигатель?
- Что такое КПД теплового двигателя?
- Что такое цикл Карно?

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как решать задачи на вычисление количества теплоты.
- Как решать задачи на вычисление работы газа.
- Как решать задачи на применение первого закона термодинамики.
- Как решать задачи на вычисление КПД цикла идеальной тепловой машины.



ЗАДАЧА 1 На какую высоту можно было бы поднять груз массой 200 кг за счёт энергии, которая выделяется при охлаждении 200 г воды от начальной температуры 100°C до температуры 10°C? Удельная теплоёмкость воды 4200 Дж/(кг·°C), теплоёмкостью стакана пренебречь.

Дано:
 $M = 200 \text{ кг}$
 $m = 200 \text{ г}$
 $t_1 = 100^\circ\text{C}$
 $t_2 = 10^\circ\text{C}$
 $c = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$
 $h = ?$

СИ
 0,2 кг

Решение:
 Запишем количество теплоты, которое выделяется при охлаждении воды:

$$Q = cm(t_1 - t_2).$$

Изменение потенциальной энергии груза

$$\Delta E_n = Mgh.$$

Согласно закону сохранения энергии

$$\Delta E_n = Q, \text{ или } Mgh = cm(t_1 - t_2).$$

Отсюда получаем

$$h = \frac{cm(t_1 - t_2)}{Mg} \approx 38 \text{ м}.$$

Этот результат вызывает удивление и наглядно демонстрирует разное «качество» внутренней и механической энергий. К сожалению, законы природы позволяют превращать в механическую энергию лишь сравнительно небольшую часть внутренней энергии вещества.

Ответ: $h \approx 38 \text{ м}$.

ЗАДАЧА 2 При изобарном процессе при давлении 200 кПа температура идеального газа увеличилась в 3 раза. Найдите начальный объём газа, если в процессе расширения он совершил работу 40 кДж.

Дано:
 $p = 200 \text{ кПа}$
 $T_2 = 3T_1$
 $A' = 40 \text{ кДж}$
 $V_1 = ?$

СИ
 $2 \cdot 10^5 \text{ Па}$
 $4 \cdot 10^4 \text{ Дж}$

Решение:
 Запишем уравнение изобары для данной массы газа:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}.$$

Так как $T_2 = 3T_1$, то $V_2 = 3V_1$.

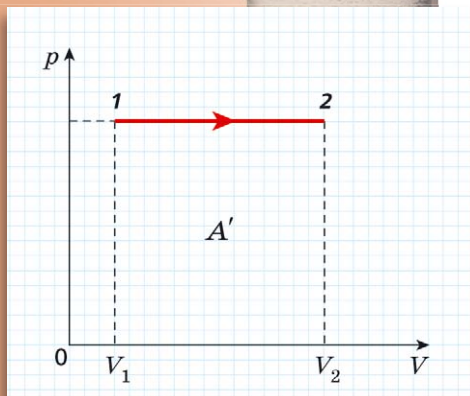
Работа газа при изобарном процессе

$$A' = p(V_2 - V_1) = 2pV_1.$$

Отсюда находим:

$$V_1 = \frac{A'}{2p} = \frac{4 \cdot 10^4}{4 \cdot 10^5} = 0,1 \text{ м}^3.$$

Ответ: $V_1 = 0,1 \text{ м}^3$.



ЗАДАЧА 3 При изобарном процессе некоторому количеству идеального одноатомного газа передаётся 50 Дж теплоты. Какую работу совершит этот газ при адиабатном расширении, если при охлаждении его температура понизилась до первоначального значения?

Дано:

$$Q_1 = 50 \text{ Дж}$$

$$T_1 = T_3$$

$$A'_2 = ?$$

Решение:

Сначала запишем первый закон термодинамики для изобарного процесса:

$$Q_{12} = Q_1 = \Delta U_1 + A'_1,$$

$$\text{где } \Delta U_1 = \frac{3}{2} \nu R (T_2 - T_1) \text{ — изменение внут-}$$

ренней энергии газа; $A'_1 = p(V_2 - V_1)$ — работа газа над внешними телами. Работу газа удобно также записать через разность температур:

$$A'_1 = pV_2 - pV_1 = \nu RT_2 - \nu RT_1 = \nu R(T_2 - T_1).$$

Поэтому

$$Q_1 = \frac{3}{2} \nu R (T_2 - T_1) + \nu R (T_2 - T_1) = \frac{5}{2} \nu R (T_2 - T_1).$$

Поскольку при адиабатном процессе теплообмен отсутствует ($Q = 0$), то первый закон термодинамики можно записать в виде $0 = \Delta U_2 + A'_2$.

Следовательно,

$$A'_2 = -\Delta U_2 = -\frac{3}{2} \nu R (T_3 - T_2).$$

Поскольку $T_3 = T_1$, то

$$A'_2 = \frac{3}{2} \nu R (T_2 - T_1).$$

Учитывая выражения для Q_1 , окончательно получаем

$$A'_2 = \frac{3}{5} Q_1 = 30 \text{ Дж}.$$

Ответ: $A'_2 = 30 \text{ Дж}$.

ЗАДАЧА 4 Идеальная тепловая машина работает по циклу Карно. Абсолютная температура нагревателя 400 К, холодильника 300 К. Во сколько раз изменится КПД цикла, если абсолютную температуру нагревателя повысить на 200 К?

Дано:

$$T_n = 400 \text{ К}$$

$$T_x = 300 \text{ К}$$

$$\Delta T = 200 \text{ К}$$

$$\frac{\eta_2}{\eta_1} = ?$$

Решение:

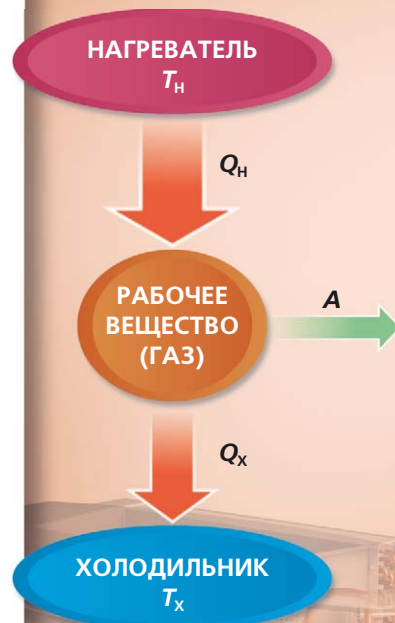
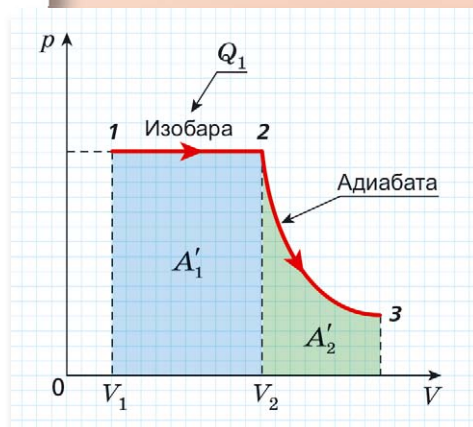
Найдём КПД машины для каждого случая:

$$\eta_1 = \frac{T_n - T_x}{T_n} = 0,25;$$

$$\eta_2 = \frac{T_n + \Delta T - T_x}{T_n + \Delta T} = 0,5.$$

Следовательно, $\frac{\eta_2}{\eta_1} = 2$.

Ответ: КПД увеличится в 2 раза.



ПЕРВЫЙ ЗАКОН

$$\Delta U = A + Q$$

$$Q = cm\Delta t$$

$$A = p\Delta V$$

кпд

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

ВТОРОЙ ЗАКОН

ЗАКОНЫ
ТЕРМОДИНАМИКИ

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT$$

ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ
ИДЕАЛЬНОГО
ОДНОАТОМНОГО ГАЗА

ПОДРОБНЕЕ...

Гулиа Н.В. Удивительная физика: О чём умолчали учебники. / Н.В. Гулиа. — М.: ЭНАС, 2008.

Энциклопедия для детей. Т. 14. Техника. — М.: Аванта+, 2001.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

- Газ под поршнем сжимается один раз быстро, а другой раз медленно до одного и того же конечного объёма. В каком случае газ нагреется больше, если сосуд не теплоизолирован?
- Возможна ли передача телу некоторого количества теплоты без повышения температуры тела?
- При накачивании шины с помощью велосипедного насоса его корпус заметно нагревается. Почему это происходит?
- Зимой температура окружающей среды ниже, чем летом. Начинает ли это, что КПД двигателей внутреннего сгорания зимой выше, чем летом?

Политехнический музей
<http://gotourl.ru/13731>

Портал журнала
«Популярная механика»
<http://gotourl.ru/13726>



МИР ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ЯВЛЕНИЙ

РАЗДЕЛ IV

Механическое движение, тепловые, звуковые и световые явления воспринимаются непосредственно нашими органами чувств. Даже если изучение этих явлений сопряжено с трудностями, мы не можем отрицать их существование — мы видим, слышим и осязаем. При изучении же электричества и магнетизма наши органы чувств уже не являются нашими помощниками, их должны заменить специальные приборы.

Впервые на явления, которые теперь называют электрическими, обратил внимание ещё в VI в. до н.э. древнегреческий философ и математик Фалес Милетский. Он изучал свойство янтаря после натирания шерстью притягивать к себе лёгкие предметы. Это были первые простейшие опыты, в которых люди столкнулись с явным проявлением электрических сил. Однако странное поведение янтаря долгое время казалось только любопытным наблюдением, никто и не предполагал, что это — проявление одного из фундаментальных взаимодействий в природе.

Первым шагом в изучении электрических явлений можно считать создание в 1660 г. Герике электрической машины. Она представляла собой шар из серы, насаженный на металлическую ось. Шар можно было вращать. Он при этом заряжался и мог создавать небольшие искры, которые наблюдались в эксперименте. Герике заметил, что шар притягивает лёгкие тела. После того как тело коснётся шара, оно тут же от него отталкивается и не притягивается снова.

В 1733 г. французский учёный Дюфе предположил, что существует два вида электричества: «стеклянное» (положительное) и «смоляное» (отрицательное). Он составил списки веществ, позволяющих получить положительное и отрицательное электричество. Дюфе сформулировал одно из ключевых положений учения об электричестве: каждое (и положительное, и отрицательное) электричество отталкивает электричество своего рода и притягивает противоположное. На современном языке это означает: одноимённые заряды отталкиваются, а разноимённые — притягиваются.

Дальнейший вклад в развитие науки об электричестве сделал выдающийся американский политический деятель и учёный Бенджамин Франклин. Он усовершенствовал теорию двух родов электричества Дюфе и в 1748 г. высказал мысль, что оба вида электричества представляют собой недостаток или избыток электричества одного вида. Это предположение легло в основу его идеи приписать электрическому заряду знак «+» или «-», что давало возможность количественного описания электрических явлений.

Следующим важным шагом стали опыты Кулона, поставленные им в конце XVIII в. Для этих опытов Кулон придумал чрезвычайно чувствительный прибор — крутильные весы. Кулон установил, как зависит сила притяжения и отталкивания между зарядами и от величины заряда, и от расстояния между ними, т.е. он установил закон взаимодействия заряженных тел, покоящихся друг относительно друга.





Но оставался непонятным главный вопрос: каким образом происходит взаимодействие двух зарядов? Ответил на него основоположник современных представлений об электромагнетизме Майкл Фарадей. Он ввёл в физику совершенно новое понятие — понятие электрического поля. Согласно его идее заряды не действуют друг на друга непосредственно («близкодействие»). Каждый из зарядов создаёт в окружающем пространстве электрическое поле. На заряд 1 действует не сам заряд 2, а созданное им поле.

Следующим этапом исследований было изучение движения электрических зарядов. Для этого требовалось создать источник электрического тока.



Делая многочисленные анатомические опыты, итальянец Гальвани сделал открытие, что если положить конечности лягушки на железную пластинку и прижать их к ней латунным крючком, то мышцы конечности всегда сокращаются. Причина состояла в том, что при соприкосновении двух различных металлов образовывался электрический заряд. Соотечественник Гальвани Александр Вольта свёл эти опыты к чистой физике. Он понял, что требуется лишь контакт между двумя разнородными металлами, разделёнными каким-нибудь проводящим веществом. Эту роль в опытах Гальвани и выполняла жидкость в конечностях лягушки. Следуя этому выводу, Вольта изготовил первый электрический элемент, состоявший из цинковой и медной пластинок, разделённых лоскутком ткани, пропитанным солёной водой или разбавленной кислотой. В 1775 г. Вольта создал устройство, которое называют «вольтов столб». Фактически это был первый источник электрического тока.

Поворот магнитной стрелки вблизи проводника с током в опытах Эрстеда впервые указал на связь электрических и магнитных явлений. Задачу «превратить магнетизм в электричество» поставил перед собой в 1821 г. М. Фарадей. На решение этой задачи он потратил около 10 лет. Успешное её решение и открытие Фарадеем закона электромагнитной индукции позволили в дальнейшем создать электрический двигатель, генератор электрического тока, электростанции.



Если XVIII век назывался веком пара, то XIX век стал веком электричества. Электричество открыло для человечества принципиально новые возможности. Паровая машина может преобразовать энергию сгорания угля в полезную работу, но использовать эту энергию можно только в том месте, где установлена угольная топка и паровой котёл. Электростанция может быть размещена на большом расстоянии от потребителя электроэнергии и при этом снабжать его необходимой электроэнергией.

Учение об электричестве и магнетизме охватывает огромную совокупность явлений природы. Трудно и даже почти невозможно указать явления, не связанные с действием электромагнитных сил. Это верно не только для физики, но и для химии, и для описания функционирования биологических объектов, например клетки. Поэтому изучение электромагнитных явлений имеет важное значение.

В 10 классе вы изучите три раздела: «Электростатика», «Законы постоянного тока» и «Электрический ток в различных средах». Дальнейшее изучение электромагнитных явлений вы продолжите в 11 классе.



Глава 8

ЭЛЕКТРОСТАТИКА

- ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД.
ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ТЕЛ
- ЗАКОН КУЛОНА
- ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ
- НАПРЯЖЁННОСТЬ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ
- ПРОВОДНИКИ И ДИЭЛЕКТРИКИ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ
- РАБОТА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ.
ПОТЕНЦИАЛ
- ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЁМКОСТЬ.
КОНДЕНСАТОРЫ
- ЭНЕРГИЯ ЗАРЯЖЕННОГО
КОНДЕНСАТОРА.
ПРИМЕНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ
- СОЕДИНЕНИЯ КОНДЕНСАТОРОВ
- РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

РАЗДЕЛ IV



ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

КОРОТКО О ГЛАВНОМ...

Нужно было обладать могучим даром научного воображения, чтобы распознать, что в описаниях электрических явлений не заряды и не частицы описывают суть явлений, а, скорее, пространство (электрическое поле) между зарядами и частицами.

А. Эйнштейн о М. Фарадее

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД. ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ТЕЛ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как соотносятся гравитационные и электромагнитные силы.
- Как осуществляется электризация тел.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое электрический заряд?
- Как взаимодействуют одноимённо и разноимённо заряженные тела?
- Что такое элементарный электрический заряд?



Согласно основной теореме электростатики любая система положительно и отрицательно заряженных частиц не может быть устойчивой. Однако огромное большинство атомов, представляющих собой совокупность положительно и отрицательно заряженных частиц, оказываются весьма устойчивыми образованиями, так как атом является системой динамической, т.е. заряженные частицы, образующие атом, находятся в состоянии непрерывного движения.

При изучении базового курса физики вы неоднократно встречались с описанием различных электрических явлений. Вы также уже обладаете начальными сведениями о том, как эти явления влияют на устойчивость атомов и молекул. Вместе с тем для более глубокого понимания структуры вещества необходимо знать количественные закономерности взаимодействий между заряженными частицами.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ Хотя в обыденной жизни мы имеем дело с электрически нейтральными телами, вы знаете, что атомы любого вещества состоят из заряженных частиц. Эти частицы, называемые элементарными, обладают массой и поэтому притягиваются друг к другу согласно закону всемирного тяготения. Как известно, силы тяготения убывают по мере увеличения расстояния между частицами обратно пропорционально квадрату расстояния. Поэтому возникает вопрос: в какой мере гравитационное взаимодействие влияет на устойчивость атомов и молекул?

Чтобы ответить на этот вопрос, нужно сопоставить силу тяготения с силой, которая возникает в результате взаимодействия между заряженными элементарными частицами. Как вы скоро узнаете, эта сила также убывает обратно пропорционально квадрату расстояния между частицами, однако в огромное число раз превышает силу тяготения. Например, в атоме водорода электрон притягивается к протону (ядру атома) с силой, в 10^{39} раз превышающей силу гравитационного притяжения.

Силы, осуществляющие взаимодействие между заряженными телами, получили название **электрических** или, более точно, **электромагнитных сил**.

Проявления электромагнитных сил чрезвычайно разнообразны. Помимо того что эти силы определяют устойчивость атомов и обуславливают взаимодействие между атомами и молекулами, в результате чего образуется конденсированное (жидкое или твёрдое) вещество, все виды сил упругости и трения имеют электромагнитную природу. Многие виды излучений имеют электромагнитную природу: видимый свет, радиоволны, тепловое излучение и т.п.

Как уже отмечалось выше, электромагнитные силы действуют только между заряженными частицами. Поэтому возникает закономерный вопрос: а что же такое электрический заряд?

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД Понятие заряда неразрывно связано с частицей — носителем заряда. Без частицы электрический заряд существовать не может. Дать точное и полное определение заряда невозможно прежде

всего потому, что это понятие относится к числу фундаментальных, несводимых к каким-либо более простым понятиям или механизмам. Другими словами, заряд нельзя разложить на составные части и изучать «изнутри». Наличие зарядов у элементарных частиц означает лишь их способность взаимодействовать друг с другом определённым образом. Интенсивность этих взаимодействий определяется электрическим зарядом. Установление законов взаимодействий между заряженными частицами означает углубление наших представлений о заряде как таковом.

Из базового курса физики вам известно, что *в природе существуют частицы с электрическими зарядами противоположных знаков. При одинаковых знаках зарядов частицы отталкиваются, а при противоположных знаках притягиваются.*

Как показали многочисленные опыты, все заряженные элементарные частицы обладают минимальным зарядом, который называют **элементарным**. Заряд элементарных частиц-протонов является положительным, а заряд электронов — отрицательным.

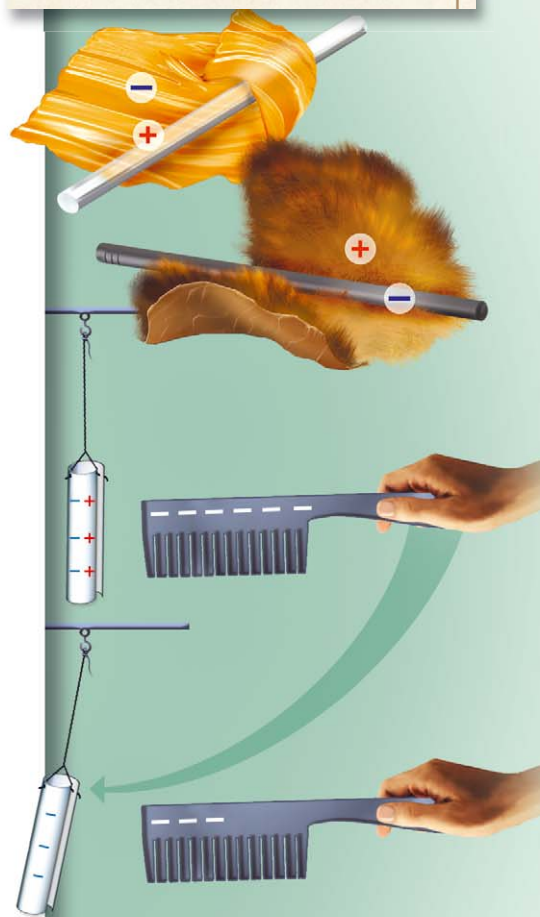
ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ТЕЛ Окружающие нас тела, как правило, электрически нейтральны. Эти тела состоят из нейтральных атомов и молекул, у которых число электронов равно числу протонов, входящих в состав ядер атомов. Макроскопическое тело является заряженным, если оно содержит избыточное число элементарных частиц с одним знаком заряда.

Электрически заряженное тело можно получить путём отделения части отрицательного заряда от связанного с ним положительного заряда. Например, это можно сделать трением. Если провести расчёской несколько раз по сухим волосам, то некоторая часть самых подвижных заряженных частиц-электронов перейдёт с волос на расчёску и зарядит её отрицательно. Волосы при этом зарядятся положительно. При электризации трением заряды тел оказываются равными: сколько электронов исчезло с волос, перенесённый совокупный отрицательный заряд на расчёску, столько же протонов образовало некомпенсированный положительный заряд на волосах.

При контакте тел подвижные заряды могут переходить с заряженного тела на незаряженное. Например, если прикоснуться отрицательно заряженной расчёской к бумажной гильзе, подвешенной на нити, то она оттолкнётся от расчёски. Это происходит потому, что из-за взаимного отталкивания часть электронов с расчёски переходит на гильзу.

Если же прикоснуться к незаряженной гильзе стеклянной палочкой, заряженной положительно (в результате её натирания о шёлк), то часть электронов с гильзы под действием сил притяжения перейдёт на палочку. В результате этого гильза зарядится положительно.

Франклин, один из основоположников учения об электричестве, свои предположения о взаимодействии заряженных тел строил на представлении об избытке или недостатке «электрической жидкости». Знаки зарядов этой «жидкости» Франклин выбрал совершенно произвольно.



ВОПРОСЫ:

- Какие физические явления основаны на электромагнитных взаимодействиях?
- Что такое электрический заряд? Можно ли дать исчерпывающую характеристику этому понятию?
- Как осуществляется электризация тел?
- Изменяется ли масса тела при его электризации?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как формулируется основной закон электростатики — закон Кулона.
- Какова единица электрического заряда в СИ.
- Что такое электрическая постоянная.

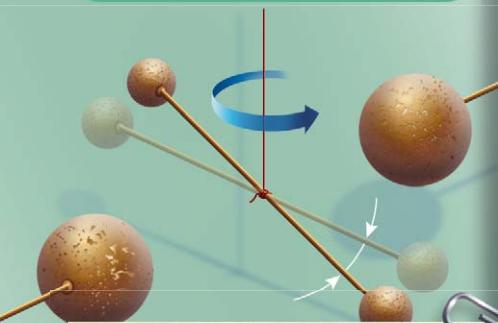
ВСПОМНИТЕ:

- Что такое электрический заряд?
- Какие знаки зарядов существуют?
- Как взаимодействуют одноимённые и разноимённые заряды?



Шарль Огюстен Кулон
(1736—1806)

Французский физик, исследователь электромагнитных и механических явлений, открыл основной закон электростатики.



...Взаимное притяжение электрической жидкости, именуемой положительной, и электрической жидкости, именуемой отрицательной, состоит в обратном отношении квадратов расстояний...

Ш. Кулон

Первые количественные закономерности электромагнитных взаимодействий были установлены в конце XVIII в. французским физиком Шарлем Кулоном. Открытый им закон по праву называют основным законом электростатики, вскрывающим характер взаимодействия двух неподвижных точечных заряженных тел. На самом деле точечных зарядов, как и материальных точек, в природе не существует. Но если расстояние между заряженными телами во много раз больше их размеров, то, как свидетельствует опыт, их размеры и форма не влияют на характер взаимодействия между ними.

ОПЫТ КУЛОНА Как показывает опыт, сила взаимодействия между заряженными телами зависит от свойств среды, в которой находятся тела. Поэтому для простоты будем считать, что взаимодействие происходит в вакууме.

Открытый Кулоном закон относится к числу фундаментальных (основных) физических законов и поэтому может быть получен только опытным путём.

Установка Кулона состояла из так называемых крутильных весов, представляющих собой стеклянный сосуд, в котором на упругой нити подвешивалось лёгкое коромысло в виде стеклянной палочки. На одном конце коромысла был закреплён металлический шарик *A*, а на другом — противовес *B*. Другой такой же металлический шарик *C* с помощью палочки закреплялся неподвижно на крышке весов.

Если шарикам *A* и *C* сообщить одинаковые заряды, то они будут отталкиваться друг от друга. Чтобы расстояние между шариками оставалось фиксированным, необходимо было закручивать упругую нить на определённый угол. По углу закручивания нити определялась сила взаимодействия между шариками.

Главная цель опытов с крутильными весами заключалась в установлении зависимости силы взаимодействия между заряженными шариками от их зарядов и расстояния между ними. И если измерение угла закручивания нити и расстояния между шариками не представляло особых трудностей, то методов измерения заряда в те времена не существовало, поскольку не было даже единиц заряда. Однако Кулон сумел изменять заряд в кратное число раз: он прикасался заряженным шариком к точно такому же незаряженному. Заряд при этом распределялся поровну между шариками, уменьшая тем самым заряд шарика в два раза. Таким же способом Кулон мог уменьшать заряд в 4, 8 раз и т. д.

ЗАКОН КУЛОНА Многократно повторенные опыты с крутильными весами позволили Кулону сформулировать закон, названный впоследствии его именем: **сила взаимодействия двух точечных неподвижных заряженных тел в вакууме прямо пропорциональна произведе-**

нию модулей зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Математическая форма записи закона Кулона имеет вид

$$F = k \frac{|q_1| |q_2|}{r^2}, \quad (1)$$

где $|q_1|$ и $|q_2|$ — модули зарядов; r — расстояние между ними; k — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора системы единиц.

ЕДИНИЦА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА В СИ единица заряда является не основной, а производной. Основной единицей измерения электрических величин в СИ является единица силы тока — *ампер*. Это значение силы тока устанавливается с помощью магнитных взаимодействий токов, о чём уже говорилось в курсе физики основной школы. Исходя из единицы силы тока, единицу заряда в СИ — кулон — устанавливают согласно правилу: **1 кулон (Кл) — это заряд, проходящий за 1 с через площадь поперечного сечения проводника при силе тока 1 А.**

Следует отметить, что 1 Кл — это очень большой заряд. Ни одно из окружающих нас тел не способно удерживать в статическом равновесии такой заряд из-за взаимного отталкивания одноимённых зарядов.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПОСТОЯННАЯ Из формулы (1) следует, что коэффициент k в законе Кулона численно равен силе, с которой взаимодействуют два точечных тела с зарядом 1 Кл каждое и находящиеся на расстоянии 1 м друг от друга. Значение этой силы, если бы её можно было измерить, очень велико: $F = 9 \cdot 10^9$ Н. Следовательно, постоянная k в законе Кулона равна:

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}. \quad (2)$$

В СИ коэффициент k обычно записывают в виде

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}, \quad (3)$$

где величину ϵ_0 (ϵ — греческая буква «эпсилон») называют **электрической постоянной**. Её значение равно:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}. \quad (4)$$



Первым закон взаимодействия электрических зарядов установил английский физик Г. Кавендиш, современник Кулона. Однако большинство своих работ по электричеству Кавендиш не публиковал, и они в течение почти ста лет хранились в архиве его семьи. Эти работы стали известны благодаря Максвеллу, которому были переданы рукописи Кавендиша.

Если обозначить величины: сила взаимодействия между двумя точечными зарядами — F , модули зарядов — $|q_1|$ и $|q_2|$, расстояние между зарядами — r , то эту силу рассчитывают по формуле

$$F = k \frac{|q_1| |q_2|}{r^2},$$

где $k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$ — постоянная в законе Кулона.

Силы взаимодействия двух неподвижных точечных зарядов направлены вдоль прямой, соединяющей эти заряды. Поэтому такие силы называют **центральными**.

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

Специальные эксперименты с проводящими сферами подтвердили, что показатель степени в законе Кулона равен 2 с точностью до 10^{-13} !

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- С помощью какого оборудования Кулон изучал взаимодействие зарядов?
- Сформулируйте закон Кулона.
- Что такое электрическая постоянная и чему равно её численное значение?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое близкодействие и действие на расстоянии.
- Что такое электрическое поле.
- Каковы основные свойства электрического поля.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое закон всемирного тяготения?
- Что такое электрический заряд?
- Как взаимодействуют заряженные тела?



Майкл Фарадей
(1791—1867)

Английский физик и химик, основоположник учения об электромагнитном поле.

Опыты Кулона, а также другие многочисленные опыты по притяжению или отталкиванию заряженных тел свидетельствуют о том, что электрически заряженные тела взаимодействуют на расстоянии. Но остаётся неясным вопрос о том, как именно одно заряженное тело воздействует на другое.

БЛИЗКОДЕЙСТВИЕ И ДАЛЬНОДЕЙСТВИЕ

Вопрос о механизме взаимодействия заряженных тел имеет длительную историю. Многие учёные, занимавшиеся разработкой основ теории электрических явлений, исходили из предположения о существовании вокруг заряженных тел особой наэлектризованной атмосферы, которая наряду с воздухом и служит той средой, посредством которой осуществляется взаимодействие.

Влияние воздуха на характер взаимодействия между заряженными телами можно проверить с помощью опыта. Для этого поместим под колокол воздушного насоса заряженный электроскоп и выкачаем из-под колокола воздух. Как показывают наблюдения, в безвоздушном пространстве лепестки электроскопа отталкиваются так же, как и в воздушной среде. Следовательно, воздух не является посредником, осуществляющим взаимодействие между заряженными телами.

Если взаимодействие между удалёнными телами осуществляется с помощью некоторой среды или промежуточных звеньев, то такой механизм передачи взаимодействия от одной точки пространства до другой получил название *теории близкодействия*. Вместе с тем предположение о существовании незримых атмосфер (сред), окружающих заряженные тела, трудно назвать последовательной научной теорией.

Взгляды учёных на механизм взаимодействия между телами претерпели существенные изменения после открытия Ньютоном закона всемирного тяготения. Была высказана идея прямого действия на расстоянии через пустоту без каких-либо посредников. Эта идея составляет сущность *теории дальнодействия*.

Теория дальнодействия предполагает мгновенную передачу действия на сколь угодно большие расстояния. Такое допущение приводит к парадоксальному выводу о том, что тело может действовать там, где его на самом деле нет. Вместе с тем, кроме самого Ньютона, убеждёнными сторонниками теории дальнодействия были такие известные учёные, как Кулон и Ампер.

ИДЕИ ФАРАДЕЯ. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Несмотря на то что большинство естествоиспытателей отдавали предпочтение теории прямого действия, к середине XVII в. наметился решительный поворот к представлениям близкодействия. Определяющую роль в изменении взглядов на процесс взаимодействия заряженных тел сыграли идеи

великого английского физика Майкла Фарадея. Согласно взглядам Фарадея заряженные тела не действуют друг на друга непосредственно. Заряды каждого из тел создают в окружающем пространстве электрическое поле. При этом поле, создаваемое зарядами одного тела, действует на заряды другого.

Во времена Фарадея факт существования электрического поля был смелой гипотезой. Дальнейшее развитие науки об электрических явлениях показало, что опытным путём обнаружить и изучить свойства электрического (электромагнитного) поля можно лишь в случае, если заряды движутся ускоренно. Только после этого все сомнения в существовании электрического поля были отброшены.

Сказанное выше можно проиллюстрировать на следующем примере. До тех пор пока заряды q_1 и q_2 неподвижны и находятся соответственно в точках A и B , на заряд q_1 со стороны заряда q_2 действует сила $\vec{F}_{12}$, направленная вдоль прямой, соединяющей эти заряды.

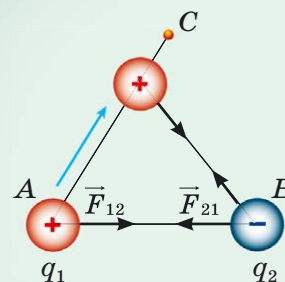
Пусть заряд q_1 начинает двигаться в направлении точки C . При этом модуль и направление силы, действующей на заряд, будут изменяться. Согласно теории дальнего действия эти изменения должны происходить мгновенно. Это означает, что в любой момент времени сила $\vec{F}_{12}$ должна быть направлена вдоль прямой, соединяющей эти заряды.

На самом деле картина явления оказывается другой. Изменение силы, действующей на заряд q_1 , наблюдается лишь через время Δt , определяемое по формуле $\Delta t = l/c$, где l — расстояние между зарядами; $c = 3,0 \cdot 10^8$ м/с — скорость света в вакууме. Это запаздывание по времени можно объяснить только на основе концепции существования электрического поля.

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ Дать исчерпывающее определение электрического поля мы не можем, поскольку не знаем, из каких элементов поле состоит. Мы можем только перечислить некоторые его особенности: во-первых, поле материально, оно существует независимо от наших знаний о нём; во-вторых, оно непрерывно в пространстве и оказывает воздействие на другие заряды. Электрическое поле неподвижных зарядов не меняется со временем и называется **электростатическим**. Это поле существует в пространстве, окружающем заряды, и неразрывно с ними связано.

Современная физика основывается на представлении об электрическом поле как особой форме материи, осуществляющей взаимодействие между заряженными телами или частицами. При этом экспериментально наблюдаемые особенности поведения электрического поля не подчиняются законам механики Ньютона. Например, распространение и установление электрического поля осуществляются со скоростью света.

По замечанию Эйнштейна, идея поля — быть может, самая оригинальная идея Фарадея — является важнейшим открытием со времён Ньютона. Из пассивного безучастного вместилища тел и электрических зарядов пространство Фарадея превращается в средоточие явлений.



Запаздывание изменений в электрическом (электромагнитном) поле создаёт определённые трудности в управлении космическими аппаратами. Например, при осуществлении посадки на поверхность планеты Венера автоматические станции получали команды с Земли спустя 3,5 мин после их отправления. Столь большое запаздывание сигнала обусловлено тем, что расстояние между Землёй и Венерой в среднем превышает 60 млн км.

ВОПРОСЫ:

- В чём заключается главное отличие близкого действия от действия на расстоянии?
- Как теория поля объясняет взаимодействие зарядов?
- Какие опытные факты доказывают существование электромагнитного поля?
- Каковы основные свойства электрического поля?

НАПРЯЖЁННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

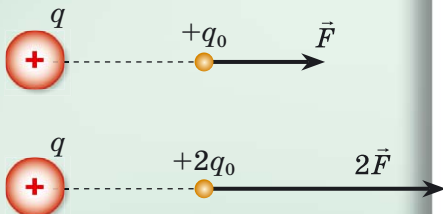
- Что такое напряжённость электрического поля.
- Что такое принцип суперпозиции полей.
- Что такое линии напряжённости электрического поля.

ВСПОМНИТЕ:

- Как находится равнодействующая нескольких сил?
- Как формулируется закон Кулона?

Если обозначить величины: напряжённость электрического поля — $\vec{E}$, сила, действующая на точечный заряд, — $\vec{F}$, величина точечного заряда — q_0 , то напряжённость поля в месте расположения заряда рассчитывают по формуле

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}.$$



Если обозначить величины: модуль напряжённости электрического поля — E , модуль заряда, создающего электрическое поле, — $|q|$, расстояние от заряда до данной точки поля — r , постоянная закона Кулона — k , то напряжённость электрического поля точечного заряда рассчитывают по формуле

$$E = k \frac{|q|}{r^2}.$$

Поскольку электрическое поле способно воздействовать на заряженные тела, необходимо ввести такую характеристику поля, которая позволяла бы определять силу, действующую на заряд в любой его точке. Эту физическую величину называют **силовой характеристикой поля**.

НАПРЯЖЁННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ Будем помещать в одну и ту же точку A поля, создаваемого зарядом q , поочерёдно заряды $q_0, 2q_0, 3q_0, \dots$, которые назовём пробными. Согласно закону Кулона на заряд q_0 будет действовать сила $\vec{F}$, пропорциональная заряду. Следовательно, на заряд $2q_0$ будет действовать в 2 раза бóльшая сила, на заряд $3q_0$ — в 3 раза бóльшая сила и т.д. Однако отношение силы, действующей на помещённый в данную точку поля пробный заряд, к величине этого заряда уже не будет зависеть от заряда. Это отношение может рассматриваться как характеристика поля, которую называют **напряжённостью электрического поля**. Поскольку сила — вектор, то и напряжённость является векторной величиной. Её обозначают буквой $\vec{E}$.

Таким образом, если на помещённый в электрическое поле заряд q_0 действует сила $\vec{F}$, то напряжённость поля в месте расположения заряда будет равна:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}. \quad (1)$$

Как следует из соотношения (1), напряжённость электрического поля численно равна силе, действующей на единичный точечный заряд, помещённый в данную точку поля. В соответствии с этим соотношением сила, действующая на заряд q_0 со стороны электрического поля, равна:

$$\vec{F} = q_0 \vec{E}. \quad (2)$$

Из формулы (2) видно, что направление вектора $\vec{E}$ совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд, и противоположно направлению силы, действующей на отрицательный заряд.

НАПРЯЖЁННОСТЬ ПОЛЯ ТОЧЕЧНОГО ЗАРЯДА Используя закон Кулона, найдём напряжённость электрического поля, создаваемого точечным зарядом q . Согласно закону Кулона этот заряд будет действовать на пробный заряд q_0 с силой

$$F = k \frac{|q||q_0|}{r^2},$$

где r — расстояние между зарядами. Поэтому модуль напряжённости поля, создаваемого точечным зарядом q на расстоянии r от него, равен:

$$E = \frac{F}{|q_0|} = k \frac{|q|}{r^2}. \quad (3)$$

Вектор напряжённости, как и вектор силы взаимодействия зарядов, направлен вдоль прямой, соединяющей эти заряды. При этом если $q > 0$, то вектор $\vec{E}$ направлен от заряда, а если $q < 0$, то к заряду.

ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ ПОЛЕЙ Если пробный заряд q_0 внести в область пространства, в котором находятся другие заряды $q_1, q_2, \dots$, то на него будут действовать силы $F_1, F_2, \dots$ со стороны каждого из зарядов. При этом результирующая сила, действующая на пробный заряд, будет равна векторной сумме сил:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots \quad (4)$$

Если теперь левую и правую части последнего равенства разделить на величину пробного заряда, то в соответствии с формулой (1) можно записать:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots \quad (5)$$

Формула (5) представляет собой математическую запись **принципа суперпозиции полей**: напряжённость результирующего электрического поля равна векторной сумме напряжённостей полей, создаваемых независимо каждым из зарядов.

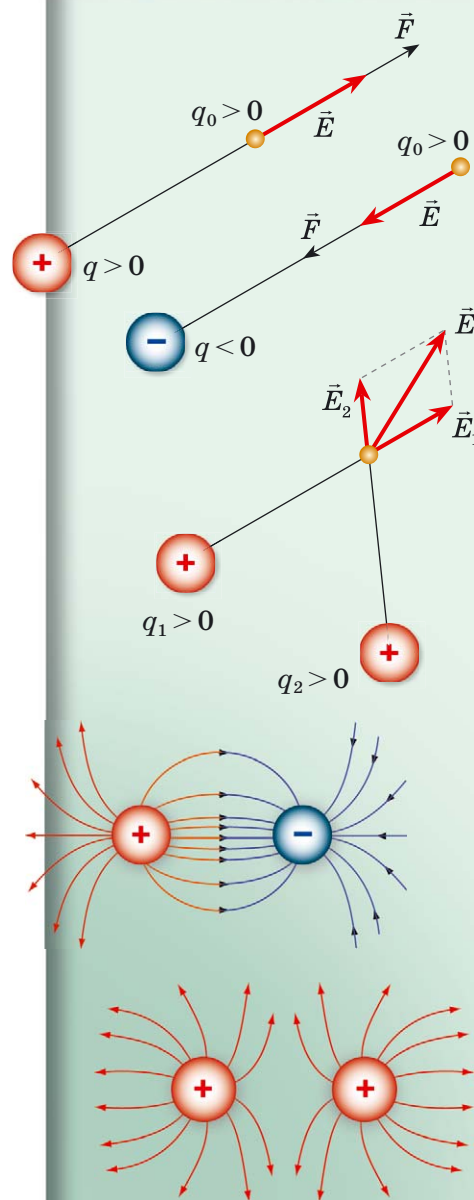
СИЛОВЫЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ Мы не можем непосредственно наблюдать электрическое поле, поэтому для наглядности наших представлений о распределении поля в пространстве вводится понятие силовых линий поля, или линий напряжённости.

Линией напряжённости электрического поля называют линию, касательная к которой в каждой точке направлена вдоль вектора напряжённости $\vec{E}$.

Силовые линии электрического поля не являются замкнутыми: они начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных. Линии напряжённости непрерывны и не могут пересекаться, поскольку их пересечение означало бы отсутствие определённого направления вектора напряжённости в данной точке. По густоте линий напряжённости можно судить о величине напряжённости поля: где густота линий больше, там больше и напряжённость поля.

ОДНОРОДНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ Особый интерес представляет электрическое поле, напряжённость которого одинакова во всех точках пространства. Такое поле называют **однородным**.

Например, поле, близкое к однородному, создаётся в пространстве между двумя металлическими пластинами, заряды которых равны по модулю и противоположны по знаку.



ВОПРОСЫ:

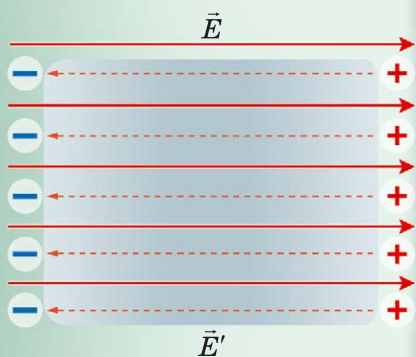
- Что называют напряжённостью электрического поля?
- По какой формуле рассчитывают напряжённость поля точечного заряда?
- В чём заключается принцип суперпозиции полей?
- Что называют силовыми линиями электрического поля?
- Какое электрическое поле называют однородным?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое свободные заряды.
- Как движутся свободные заряды проводника при помещении его в электрическое поле.
- Может ли существовать поле внутри проводника в случае равновесия зарядов.
- Что такое диэлектрики и чем они отличаются от проводников.
- Что такое поляризация диэлектриков.
- Что такое диэлектрическая проницаемость среды.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое электрическое поле?
- Какие вещества называют проводниками?
- Как движутся заряженные частицы в электрическом поле?



Внутри электрометра имеются заряды и электрическое поле

ПРОВОДНИКИ И ДИЭЛЕКТРИКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Большой практический интерес представляют вопросы о поведении тел, обладающих различной электрической проводимостью, при их помещении в электрическое поле или при сообщении им электрических зарядов.

СВОБОДНЫЕ ЗАРЯДЫ В ПРОВОДНИКАХ В проводниках, к которым относятся металлы и растворы электролитов, имеются заряженные частицы, способные перемещаться внутри проводника, если проводник поместить в электрическое поле. Заряды таких частиц называют **свободными зарядами**. В металлических проводниках носителями свободных зарядов являются электроны. Хотя все металлы состоят из нейтральных атомов, в результате их взаимодействия электроны, принадлежащие внешним оболочкам атомов, теряют с ними связи и свободно перемещаются по всему объёму проводника.

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ВНУТРИ ПРОВОДНИКА Наличие свободных зарядов в проводнике позволяет сделать важный вывод о том, что внутри проводника электростатическое поле отсутствует. Действительно, если напряжённость электрического поля внутри проводника была бы отлична от нуля, то свободные заряды под действием сил поля пришли бы в направленное движение, вызывая электрический ток. На самом деле такого не наблюдается.

Попробуем это понять на примере незаряженной проводящей пластины, внесённой в электрическое поле. Под действием поля свободные электроны в пластине придут в движение и начнут перемещаться против линий напряжённости, т.е. в пластине в течение очень короткого времени будет протекать электрический ток. В результате одна поверхность пластины зарядится отрицательно, а другая — положительно. Появившиеся на поверхностях пластины заряды создают своё поле, линии напряжённости $\vec{E}'$ которого будут направлены против линий напряжённости $\vec{E}$ внешнего поля. При этом *напряжённость результирующего поля внутри проводника оказывается равной нулю*.

Рассмотренное явление называется **электростатической индукцией**. На этом явлении основана так называемая **электростатическая защита**. Поле в проводнике отсутствует и в случае, если он внутри полый. Поэтому, чтобы защитить точные приборы от влияния электрического поля, их помещают внутрь металлического ящика или окружают со всех сторон металлической сеткой.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАРЯДОВ В ПРОВОДНИКЕ Поскольку в проводнике электрическое поле отсутствует, то внутри его не может содержаться избыточный заряд. Если бы

внутри проводника содержался заряд, то вокруг заряда имелось бы и электрическое поле. Таким образом, весь статический заряд проводника сосредоточен на его поверхности. При этом силовые линии электростатического поля вне проводника перпендикулярны его поверхности. Если бы вдоль поверхности проводника имелась составляющая поля, это приводило бы к движению зарядов по этой поверхности, чего на самом деле не наблюдается.

ДИЭЛЕКТРИКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ. ПОЛЯРИЗАЦИЯ

ДИЭЛЕКТРИКОВ Диэлектрики (изоляторы), как и металлы, состоят из нейтральных атомов и молекул. Однако заряженные частицы, из которых состоят атомы (электроны и ядра атомов), связаны значительно большими силами, чем в металлах. Поэтому в диэлектриках свободных зарядов практически нет.

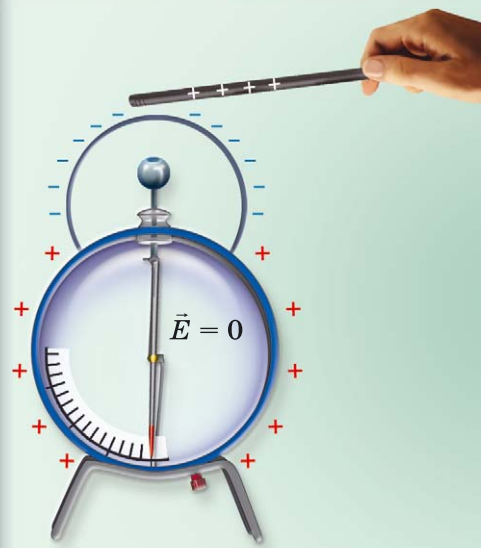
Поведение диэлектриков в электрическом поле существенно отличается от поведения проводников. Уравновесим незаряженную пластиковую линейку на гладкой выпуклой поверхности. Если теперь к концу линейки поднести заряженную палочку, то линейка к ней притянется. Хотя аналогичное явление наблюдается и для проводников, на самом деле имеется большое различие. Дело в том, что *при помещении диэлектрика в электрическое поле в нём не происходит разделения зарядов* так, как это происходит в проводниках. Если диэлектрическую пластину, помещённую в электрическое поле, разделить на две части, то каждая из них окажется незаряженной. Почему же тогда диэлектрик притягивается к заряженному телу?

Такое поведение диэлектрика объясняется явлением, которое называют **поляризацией диэлектрика**. В результате действия электрического поля при поляризации происходит смещение в противоположные стороны разноимённых зарядов, входящих в состав атомов и молекул. При этом на противоположных поверхностях диэлектрической пластины возникают связанные заряды противоположных знаков, которые не могут перемещаться по диэлектрику.

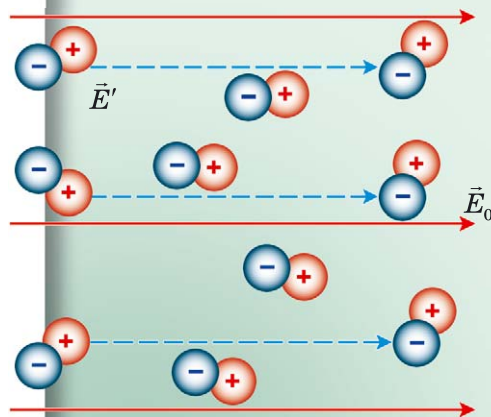
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ Связанные поверхностные заряды диэлектрика создают внутри его электрическое поле, вектор напряжённости E' которого направлен против вектора напряжённости E_0 внешнего поля. Это приводит к уменьшению результирующего поля внутри диэлектрика: $E = E_0 - E'$.

Степень ослабления поля зависит от так называемой диэлектрической проницаемости среды. Диэлектрическая проницаемость среды ε — это физическая величина, показывающая, во сколько раз модуль напряжённости E электрического поля внутри однородного диэлектрика меньше модуля напряжённости E_0 поля в вакууме:

$$\varepsilon = E_0/E.$$



Стержень электрометра накрыт металлическим колпачком. Внутри электрометра нет зарядов и нет поля. Все индуцированные заряды располагаются на внешней поверхности прибора.



ВОПРОСЫ:

- Что происходит со свободными зарядами проводника при помещении его в электрическое поле?
- Могут ли существовать внутри проводника заряд и электрическое поле?
- Что такое поляризация диэлектрика?
- Что такое диэлектрическая проницаемость среды?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое электростатическая энергия заряда.
- Как вычисляется работа в электростатическом поле.
- Что такое потенциал электростатического поля.
- Как можно записать разность потенциалов двух точек электрического поля.
- В каких единицах измеряется разность потенциалов.

ВСПОМНИТЕ:

- Как вычисляется работа в механике?
- Как работа связана с изменением потенциальной энергии тела?
- Как вычисляется сила, действующая на заряд в электрическом поле?

РАБОТА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ. ПОТЕНЦИАЛ

Когда мы подносим наэлектризованную эбонитовую палочку к бумажной гильзе, подвешенной на нити, гильза будет притягиваться к палочке. Поскольку в этом и других подобных опытах под действием электрических сил происходит перемещение тел, то указанные силы совершают механическую работу.

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ Поскольку гравитационные и электрические взаимодействия имеют одинаковую зависимость от расстояния между телами, то для систем заряженных тел по аналогии со случаем гравитационного взаимодействия также вводится понятие потенциальной энергии, которая называется **электростатической энергией**. Таким образом, заряженное тело в электрическом поле обладает запасом электростатической энергии.

РАБОТА В ОДНОРОДНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ Рассмотрим перемещение точечного заряда в однородном электрическом поле, которое создаётся большими металлическими пластинами, имеющими заряды противоположных знаков.

Вычислим работу, совершаемую электрическими силами при перемещении положительного заряда q , находящегося на расстоянии d_1 от отрицательно заряженной пластины, в точку поля, расположенную на меньшем расстоянии d_2 от этой же пластины. Будем считать, что точки поля B и C лежат на одной силовой линии. На заряд q со стороны поля действует постоянная сила $\vec{F} = q\vec{E}$, что полностью аналогично случаю, когда Земля действует на тело с постоянной силой тяжести $\vec{F}_{\text{тяж}} = m\vec{g}$.

При перемещении $\overline{BC}$, модуль которого $BC = d = d_1 - d_2$, силы поля совершают положительную работу:

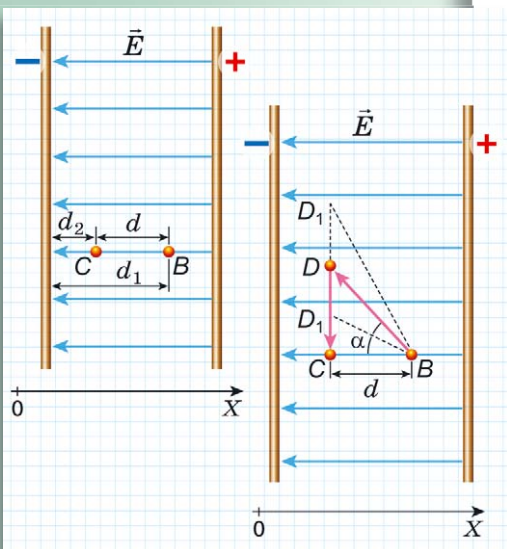
$$A = qE(d_1 - d_2) = qEd. \quad (1)$$

Пусть заряд сначала из точки B перемещается по прямой в некоторую точку D , а затем из точки D — в точку C . При этом работа сил электрического поля равна

$$A = A_{BD} + A_{DC} = qE \cdot BD \cos \alpha + qE \cdot DC \cos 90^\circ = qEd.$$

Если заряд сначала перемещается в некоторую точку D_1 , лежащую либо выше, либо ниже точки D , а затем по прямой D_1C перемещается в конечную точку C траектории, то работа, очевидно, будет также рассчитываться по формуле (1).

Таким образом, работа сил однородного электрического поля при перемещении заряда по прямой BC и по ломаной BDC оказывается одинаковой. Это означает, что *работа не зависит от формы траектории, а зависит лишь от перемещения заряда вдоль силовой линии поля.*



Если обозначить величины: работа сил электрического поля — A , величина перемещаемого заряда — q , модуль напряжённости электрического поля — E , модуль перемещения заряда вдоль силовой линии — d , то работу в однородном электрическом поле рассчитывают по формуле

$$A = qEd.$$

ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Как известно из механики, если работа не зависит от формы траектории, то она равна изменению потенциальной энергии, взятому со знаком «минус»:

$$A = -(W_{п2} - W_{п1}) = -\Delta W_{п}. \quad (2)$$

Отсюда следует, что потенциальная энергия заряда в точке B равна $W_{п1} = qEd_1$, а в точке C равна $W_{п2} = qEd_2$.

Потенциальная энергия заряда в электрическом поле зависит от знака заряда: если $q > 0$, то энергия положительна, если $q < 0$, то энергия отрицательна.

Значение потенциальной энергии зависит от нулевого уровня. В рассматриваемом случае нулевой уровень отсчёта энергии следует выбирать на отрицательно заряженной пластине. Вместе с тем физический смысл имеет не само значение энергии, а разность её значений, которая определяется работой сил поля при перемещении заряда из начального положения в конечное.

ПОТЕНЦИАЛ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ Как видно из формул (1) и (2), потенциальная энергия заряда в электрическом поле пропорциональна заряду. Однако отношение потенциальной энергии к заряду не зависит уже от величины заряда. Поэтому вводится важная количественная характеристика поля — *потенциал*, не зависящий от заряда.

Таким образом, **потенциалом электростатического поля называют отношение потенциальной энергии заряда в поле к этому заряду:**

$$\varphi = \frac{W_{п}}{q}. \quad (3)$$

В случае однородного поля согласно формулам (1)–(3) потенциал поля равен

$$\varphi = \frac{qEd}{q} = Ed. \quad (4)$$

Потенциал φ в отличие от напряжённости $\vec{E}$ — скаляр, это *энергетическая характеристика поля*.

РАЗНОСТЬ ПОТЕНЦИАЛОВ. НАПРЯЖЕНИЕ С учётом формул (1), (2) и (4) выражение для работы можно записать в виде

$$A = W_{п1} - W_{п2} = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU. \quad (5)$$

Величину $U = \varphi_1 - \varphi_2$ называют разностью потенциалов двух точек поля. Часто эту величину называют также напряжением. Разность потенциалов между двумя точками поля равна единице, если при перемещении заряда 1 Кл из одной точки поля в другую электрическое поле совершает работу в 1 Дж. Единицу разности потенциалов называют *вольт*ом (В): $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж}/1 \text{ Кл}$.

Формулы (1) и (5) позволяют установить связь между напряжением и напряжённостью однородного электрического поля:

$$U = Ed. \quad (6)$$

Если обозначить величины:
потенциал точки поля — φ ,
потенциальная энергия заряда в данной точке поля — $W_{п}$,
величина заряда — q ,
то потенциал данной точки поля рассчитывают по формуле

$$\varphi = \frac{W_{п}}{q}.$$

При движении по синтетическому ковру на кожных покровах человека образуется большой статический заряд. Если после этого прикоснуться пальцами к какому-либо предмету, возникает искра длиной несколько миллиметров. При этом потенциал тела человека может достигать от 10 000 до 20 000 вольт.

Разность потенциалов между облаком и Землёй при возникновении молнии может достигать нескольких миллиардов вольт!

ВОПРОСЫ:

- Почему заряженные тела, помещённые в электрическое поле, обладают энергией?
- Как вычисляется работа в электростатическом поле?
- Как связано изменение потенциальной энергии заряда с работой?
- Что такое потенциал электростатического поля?
- Как можно записать разность потенциалов между двумя точками однородного электростатического поля?
- В каких единицах измеряют потенциал?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое электрическая ёмкость.
- Что такое плоский конденсатор.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое разность потенциалов и напряжение?
- Как связаны напряжение и напряжённость в случае однородного электрического поля?
- Как вычисляется сила, действующая на заряд в электрическом поле?

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЁМКОСТЬ. КОНДЕНСАТОРЫ

Довольно часто зарядение тел, т.е. сообщение телам некоторого заряда, представляет большой практический интерес. Способы зарядения могут быть самыми разными — трением, посредством явления электростатической индукции, с использованием электростатической машины и т.п. От каких свойств проводника прежде всего зависит величина заряда, сообщаемого ему при электризации?

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЁМКОСТЬ Рассмотрим процесс зарядения двух проводящих пластин от электрофорной машины. В процессе зарядения один из проводников приобретает заряд $+q$, а другой $-q$. При этом между пластинами возникает электрическое поле, которое способно совершать работу по перемещению зарядов. Разумно предположить, что напряжение U между двумя проводниками пропорционально зарядам, находящимся на проводниках, т.е. зарядам $+q$ и $-q$. Действительно, если заряды пластин увеличить вдвое, то и напряжённость электрического поля, порождаемого этими зарядами, станет в 2 раза больше. При этом работа, совершаемая силами поля, также увеличится в 2 раза, что соответствует увеличению в 2 раза и напряжения между пластинами.

Вместе с тем пропорциональность между зарядом проводников и напряжением между ними означает, что отношение заряда проводника к разности потенциалов не зависит от значения заряда.

Отношение заряда одного из проводников к разности потенциалов между проводниками определяет важную физическую величину, которую называют **электроёмкостью** двух проводников. **Электрической ёмкостью** двух проводников, обладающих равными по модулю разноимёнными зарядами, называют отношение заряда одного из проводников к разности потенциалов между ними:

$$C = \frac{q}{U}. \quad (1)$$

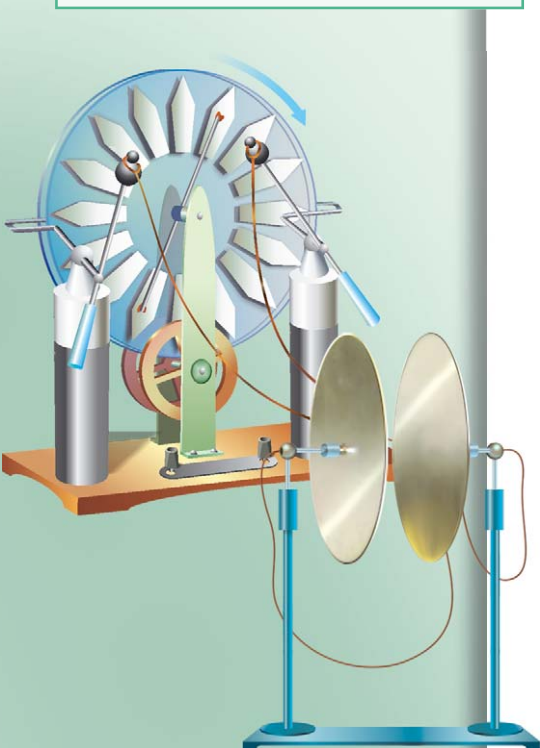
КОНДЕНСАТОР. ЭЛЕКТРОЁМКОСТЬ ПЛОСКОГО КОНДЕНСАТОРА

Устройство, состоящее из двух, как правило, близко расположенных проводников, называют **конденсатором**. Конденсатор является накопителем электрических зарядов (от лат. *condensation* — накопление). Простейший конденсатор состоит из двух металлических пластин (обкладок), разделённых слоем диэлектрика, например воздуха или слюды. Такой конденсатор называют **плоским**.

Силовые линии электрического поля заряженного конденсатора начинаются на положительно заряженной обкладке и оканчиваются на отрицательно заряженной. В результате электрическое поле практически полностью сосредоточено внутри конденсатора.

Если обозначить величины: электрическая ёмкость двух близко расположенных проводников — C , заряд одного из проводников — q , разность потенциалов между проводниками — U , то электрическую ёмкость этих проводников рассчитывают по формуле

$$C = \frac{q}{U}.$$



Как показывают расчёты, ёмкость плоского конденсатора можно выразить формулой

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}, \quad (2)$$

где ε_0 — электрическая постоянная; ε — диэлектрическая проницаемость диэлектрика, помещённого между обкладками; S — площадь одной из обкладок; d — расстояние между обкладками. Если между обкладками конденсатора находится воздух, то $\varepsilon = 1$.

Как следует из формулы (2), ёмкость плоского конденсатора будет тем больше, чем меньше расстояние между его обкладками и чем больше площадь каждой из них. Зависит электроёмкость и от диэлектрических свойств среды между обкладками конденсатора.

ЕДИНИЦЫ ЭЛЕКТРОЁМКОСТИ Единицу электроёмкости можно ввести согласно формуле (1): электроёмкость двух проводников равна единице, если при сообщении им зарядов $+1$ Кл и -1 Кл между ними возникает разность потенциалов 1 В. Эта единица — *фарад* (Ф), названная в честь великого английского физика М. Фарадея:

$$1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл/1 В}.$$

Ёмкость 1 Ф очень велика. Используемые на практике конденсаторы имеют ёмкости, не превышающие тысячных долей фарада.

Чтобы наглядно представить себе, насколько велика электроёмкость 1 Ф, с помощью формулы (2) вычислим, какую площадь должна иметь каждая из обкладок плоского конденсатора, если расстояние между ними равно 1 мм. Из формулы (2) в случае воздуха находим:

$$S = \frac{Cd}{\varepsilon_0} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{8,85 \cdot 10^{-12}} \approx 1,13 \cdot 10^8 \text{ м}^2.$$

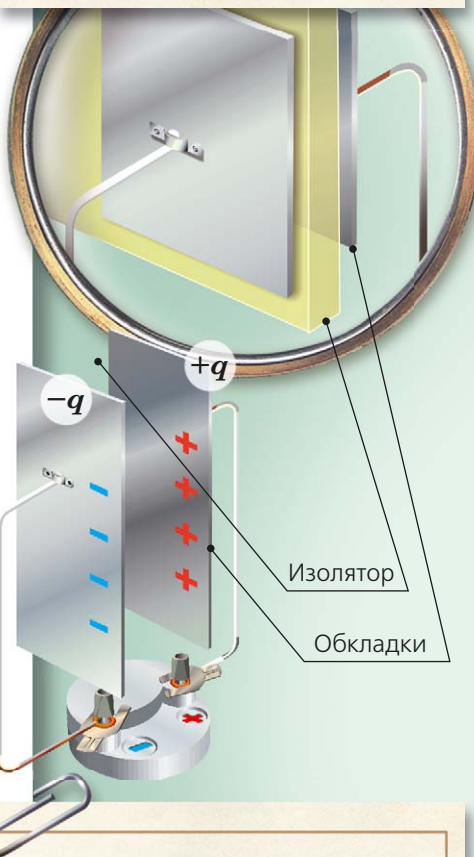
Полученный результат означает, что площадь каждой из обкладок должна быть равна площади квадрата, длины сторон которого превышают 10 км!

УСТРОЙСТВО И ТИПЫ КОНДЕНСАТОРОВ В целях увеличения ёмкости и уменьшения размеров металлические электроды конденсаторов обычно изготавливают в виде тонкой фольги. При этом в качестве диэлектрика используют парафиновую бумагу, слюду, керамику и т. д.

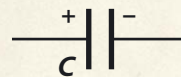
Значительного повышения ёмкости за счёт уменьшения расстояния между обкладками удаётся достичь в так называемых электролитических конденсаторах, в которых слоем изолятора служит очень тонкая плёнка оксида алюминия, наносимая на фольгу. Свёрнутую в рулон фольгу помещают в герметичный корпус, куда заливают электролит. Особенность электролитических конденсаторов заключается в том, что их включение в цепь осуществляется с учётом полярности. Этого не требуется при использовании бумажных, слюдяных или керамических конденсаторов.

Если обозначить величины: электрическая ёмкость — C , площадь обкладок — S , расстояние между обкладками — d , электрическая постоянная — ε_0 , диэлектрическая проницаемость среды — ε , то электроёмкость плоского конденсатора рассчитывают по формуле

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}.$$



В электрических схемах для конденсаторов используют условное изображение



ВОПРОСЫ:

- Какую физическую величину называют электроёмкостью двух проводников?
- Чему равна электроёмкость плоского конденсатора?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как выражается энергия заряженного конденсатора.
- Для каких целей используются конденсаторы.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое разность потенциалов и напряжение?
- Как связаны напряжение и напряжённость в случае однородного электрического поля?
- Как вычисляется сила, действующая на заряд в электрическом поле?



Если обозначить величины: энергия заряженного конденсатора — W_c , заряд конденсатора — q , напряжение между обкладками — U , электроёмкость конденсатора — C , то энергию конденсатора рассчитывают по формуле

$$W_c = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2}.$$

**ВОПРОСЫ:**

- Какие вы знаете технические устройства, в которых применяют конденсаторы?

ЭНЕРГИЯ ЗАРЯЖЕННОГО КОНДЕНСАТОРА. ПРИМЕНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ

Заряженный конденсатор обладает запасом энергии. В этом можно убедиться, если к выводам обкладок заряженного конденсатора подключить электрическую лампочку. При этом будет наблюдаться кратковременная вспышка света.

ЭНЕРГИЯ ЗАРЯЖЕННОГО КОНДЕНСАТОРА Предположим, что между обкладками конденсатора, заряды которых $+q$ и $-q$, находится очень тонкий слой диэлектрика, разделяющий пластины. За счёт диэлектрика заряды соприкасающихся обкладок конденсатора не могут нейтрализовать друг друга.

Для того чтобы одну из обкладок удалить от другой на некоторое расстояние d , внешняя сила должна совершить работу. Величина этой силы равна по модулю силе электростатического взаимодействия между обкладками. Одна из заряженных обкладок находится в электрическом поле другой обкладки, поэтому модуль силы электростатического взаимодействия $F_{эл} = |q| \cdot E/2$, где $E/2$ — напряжённость поля, создаваемого зарядами одной из пластин; E — напряжённость результирующего поля между пластинами. Следовательно, работа внешней силы $A = qEd/2$. Согласно закону сохранения энергии эта работа равна энергии электрического поля, образованного зарядами обкладок конденсатора после их разведения на расстояние d :

$$W_c = q \frac{E}{2} d.$$

Так как напряжение между обкладками $U = Ed$, то

$$W_c = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2}, \text{ так как } q = CU.$$

ПРИМЕНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ В отличие от обычных источников, конденсатор обладает одним важным преимуществом: при разрядке конденсатор способен отдавать энергию за очень короткое время. Это означает, что мощность разряда конденсатора может быть весьма большой.

Отмеченное свойство конденсаторов широко используется на практике. Например, лампа-вспышка фотоаппарата питается током разрядки конденсатора, который заряжается от специальной батареи. По аналогичному принципу работает и газоразрядная трубка лазера: вспышка трубки осуществляется при разрядке батареи конденсаторов.

Наиболее широкое применение конденсаторы находят в радиотехнике. Конденсаторы необходимы в устройствах, осуществляющих генерацию, передачу и приём электромагнитных колебаний высокой частоты, без которых немислимо существование радио и телевидения.

СОЕДИНЕНИЯ КОНДЕНСАТОРОВ

Конденсатор как накопитель электрической энергии не может конкурировать с источниками тока, например с аккумуляторами. Энергия заряженного конденсатора, как правило, не превышает нескольких сотен джоулей. Поэтому для решения целого ряда практических задач конденсаторы соединяют в так называемые батареи. В зависимости от способов соединения конденсаторов решаются вопросы создания больших ёмкостей и, следовательно, накопления большого заряда.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ

При последовательном соединении конденсаторов вследствие явления электростатической индукции заряды любой из обкладок конденсаторов всегда разноимённые, но равны по абсолютному значению. При этом общее напряжение на батарее, состоящей из двух конденсаторов, равно сумме напряжений на каждом из них:

$$U = U_1 + U_2.$$

Поскольку обкладки, соединённые проводником, в целом электронейтральны, то суммарный заряд батареи равен заряду q любого из конденсаторов.

Учитывая, что

$$U = \frac{q}{C}, U_1 = \frac{q}{C_1}, U_2 = \frac{q}{C_2},$$

получаем

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2},$$

где C — суммарная ёмкость батареи.

ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ

При параллельном соединении конденсаторов попарно соединяются одноимённо заряженные обкладки. В этом случае напряжение на каждом из конденсаторов одинаково:

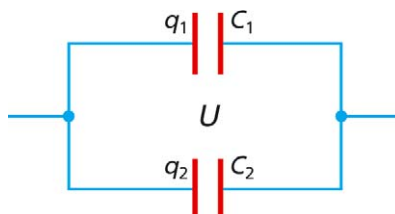
$$U = U_1 = U_2,$$

а суммарный заряд батареи равен сумме зарядов обкладок конденсаторов: $q = q_1 + q_2$. Поэтому суммарная электроёмкость равна

$$C = \frac{q}{U} = \frac{q_1 + q_2}{U}.$$

Учитывая, что $q_1 = C_1 U$, $q_2 = C_2 U$, получаем

$$C = C_1 + C_2.$$



60

ВЫ УЗНАЕТЕ:

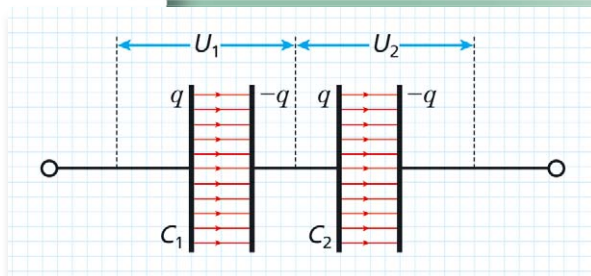
- Что такое последовательное соединение конденсаторов.
- Что такое параллельное соединение конденсаторов.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое электрическая ёмкость?
- Что такое плоский конденсатор?
- От каких величин зависит энергия заряженного конденсатора?

При **последовательном соединении** конденсаторов величина обратной электроёмкости батареи равна сумме обратных электроёмкостей каждого из конденсаторов:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}.$$



При **параллельном соединении** конденсаторов суммарная электроёмкость батареи равна сумме электроёмкостей каждого из конденсаторов:

$$C = C_1 + C_2.$$

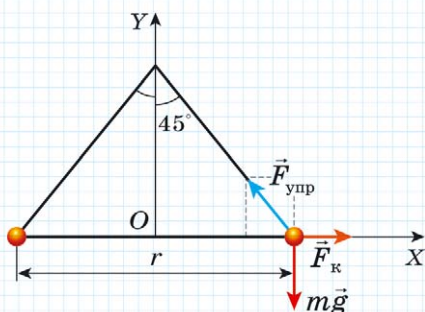
ВОПРОСЫ:

- Как вычисляется суммарная электроёмкость двух последовательно соединённых конденсаторов? двух параллельно соединённых конденсаторов?

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как решать задачи на взаимодействие между заряженными телами.
- Как решать задачи на расчёт работы в электрическом поле.
- Как решать задачи на расчёт энергии заряженного конденсатора.



ЗАДАЧА 1 Два одинаковых шарика массой по 400 мг, заряженные равными одноимёнными зарядами, подвесили в одной точке на нитях равной длины. При этом шарики разошлись на 15 см друг от друга, причём нити образовали прямой угол. Найдите заряд каждого шарика.

Дано:
 $m = 400 \text{ мг}$
 $r = 15 \text{ см}$

СИ
 $400 \cdot 10^{-6} \text{ кг}$
 $0,15 \text{ м}$

$q = ?$

Решение:

На рисунке указаны силы, действующие на один из шариков. Условия равновесия шарика в проекциях на координатные оси OX и OY :

$$F_k - F_y \cos 45^\circ = 0, \quad F_y \sin 45^\circ - mg = 0,$$

где $F_k = k \frac{q^2}{r^2}$ — кулоновская сила; F_y — сила упругости, действующая на шарик со стороны нити. Исключив из уравнений силу упругости, получим

$$mg = k \frac{q^2}{r^2}.$$

Из последнего равенства находим: $q = r \sqrt{\frac{mg}{k}}.$

Подставив числовые значения, получим

$$q = 0,15 \sqrt{\frac{400 \cdot 10^{-6} \cdot 10}{9 \cdot 10^9}} \text{ Кл} = 10^{-7} \text{ Кл}.$$

Ответ: $q = 10^{-7} \text{ Кл}.$

ЗАДАЧА 2 Найдите напряжённость однородного электрического поля, если при перемещении электрона из точки B в точку C силами поля совершена работа $1,6 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$. Модуль перемещения электрона $|BC| = 10 \text{ см}$, $\alpha = 60^\circ$.

Дано:
 $A = 1,6 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$
 $|q| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
 $|BC| = 10 \text{ см}$
 $\alpha = 60^\circ$

СИ
 $0,1 \text{ м}$

$E = ?$

Решение:

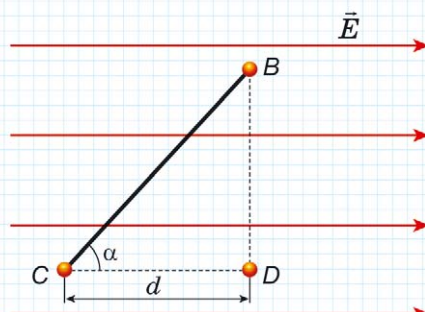
Работа в электрическом поле не зависит от формы траектории. Поэтому перемещение электрона по прямой BC можно заменить перемещением по ломаной BDC :

$$A_{BC} = A_{BD} + A_{DC} = A_{DC},$$

так как $A_{BD} = 0$, поскольку на этой части траектории направление силы, действующей на электрон, перпендикулярно его перемещению. Таким образом,

$$A_{BC} = |q|Ed = |q|E|BC|\cos\alpha.$$

Из последнего равенства находим: $E = \frac{A_{BC}}{|q||BC|\cos\alpha}.$



Подставив числовые значения, получим

$$E = \frac{1,6 \cdot 10^{-18}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,1 \cdot \cos 60^\circ} \frac{\text{В}}{\text{м}} = 200 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

Ответ: $E = 200 \text{ В/м}$.

ЗАДАЧА 3 Первоначально покоившийся электрон переместился в однородном электрическом поле из точки B с потенциалом 300 В в точку C с потенциалом 400 В . Найдите кинетическую энергию электрона, а также изменение его потенциальной энергии взаимодействия с полем. Заряд электрона равен $-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.

Дано:

$$\varphi_B = 300 \text{ В}$$

$$\varphi_C = 400 \text{ В}$$

$$q = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$W_{\text{к}} - ?$$

$$\Delta W_{\text{п}} - ?$$

Решение:

Запишем выражения для работы, совершаемой силами поля над электроном:

$$A = q(\varphi_B - \varphi_C).$$

По теореме об изменении кинетической энергии имеем

$$W_{\text{к}} = A = q(\varphi_B - \varphi_C).$$

Изменение потенциальной энергии электрона

$$\Delta W_{\text{п}} = W_{2\text{п}} - W_{1\text{п}} = q(\varphi_C - \varphi_B).$$

Подставив числовые значения, получим

$$W_{\text{к}} = -1,6 \cdot 10^{-19} \cdot (-100) \text{ Дж} = 1,6 \cdot 10^{-17} \text{ Дж};$$

$$\Delta W_{\text{п}} = -1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 100 \text{ Дж} = -1,6 \cdot 10^{-17} \text{ Дж}.$$

Ответ: $W_{\text{к}} = 1,6 \cdot 10^{-17} \text{ Дж}$; $\Delta W_{\text{п}} = -1,6 \cdot 10^{-17} \text{ Дж}$.

ЗАДАЧА 4 В электрическом поле плоского конденсатора находится в равновесии пылинка массой 1 мкг , обладающая зарядом -1 мкКл . Найдите энергию конденсатора, если его ёмкость $0,1 \text{ мкФ}$, а расстояние между обкладками 1 см .

Дано:

$$m = 1 \text{ мкг}$$

$$q_0 = -1 \text{ мкКл}$$

$$C = 0,1 \text{ мкФ}$$

$$d = 1 \text{ см}$$

$$W - ?$$

СИ

$$10^{-6} \text{ кг}$$

$$-10^{-6} \text{ Кл}$$

$$10^{-7} \text{ Ф}$$

$$10^{-2} \text{ м}$$

Решение:

Запишем условие равновесия пылинки в проекции на направление оси OY :

$$F_{\text{к}} - mg = 0,$$

где кулоновская сила

$$F_{\text{к}} = |q_0|E = |q_0| \frac{U}{d},$$

так как напряжение и напряжённость связаны формулой $U = Ed$. Следовательно,

$$|q_0| \frac{U}{d} = mg \rightarrow U = \frac{mgd}{|q_0|}.$$

Используя формулу для энергии $W = \frac{CU^2}{2}$, получаем

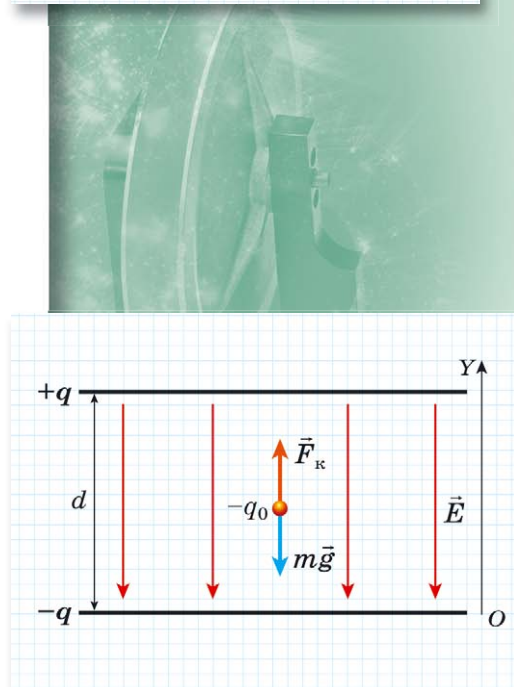
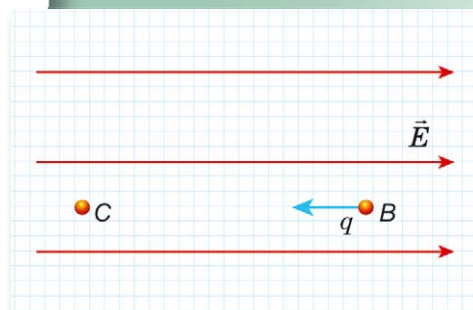
$$W = \frac{C}{2} \left(\frac{mgd}{|q_0|} \right)^2 = \frac{10^{-7}}{2} \left(\frac{10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^{-2}}{10^{-6}} \right)^2 \text{ Дж} = 5 \cdot 10^{-10} \text{ Дж}.$$

Ответ: $W = 5 \cdot 10^{-10} \text{ Дж}$.

Как известно, между напряжённостью однородного электрического поля и разностью потенциалов существует взаимосвязь:

$$E = \frac{U}{d}.$$

Поэтому единицей напряжённости в СИ является не только ньютон на кулон (Н/Кл), но и вольт на метр (В/м). Именно эту единицу напряжённости используют обычно при решении практических задач.



$$\varphi = \frac{W_{\text{п}}}{q}$$

Потенциал

$$U = Ed$$

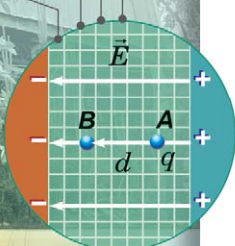
Напряжение

$$A = qEd$$

Работа

$$E = \frac{F}{q}$$

Напряжённость



ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

● **Закон Кулона:** сила взаимодействия двух точечных неподвижных заряженных тел в вакууме прямо пропорциональна произведению модулей зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

● **Электрическое поле** — это особый вид материи, оно непрерывно в пространстве и оказывает воздействие на другие заряды. Для наглядности электрическое поле принято изображать при помощи так называемых силовых линий.

● **Силовая характеристика** электрического поля — напряжённость — это отношение силы, действующей на помещённый в данную точку поля пробный заряд, к величине этого заряда.

● **Принцип суперпозиции полей:** напряжённость результирующего электрического поля равна векторной сумме напряжённостей полей, создаваемых независимо каждым из зарядов.

● **Заряженное тело** в электрическом поле обладает запасом электростатической энергии. Энергетическая характеристика поля — потенциал — это отношение потенциальной энергии заряда в поле к этому заряду.

● **Электрической ёмкостью** двух проводников называют отношение заряда одного из проводников к разности потенциалов между ними.



ЗАКОН КУЛОНА

$$F = k \frac{|q_1| |q_2|}{r^2}, \text{ где } k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$$

ПОДРОБНЕЕ...

Суорц К.Л.Э. Необыкновенная физика обыкновенных явлений. Т.2. / К.Л.Э. Суорц. — М.: Наука, 1987.

Энциклопедия для детей. Т.16. Физика. Ч.2. Электричество и магнетизм. Термодинамика и квантовая механика. Физика ядра и элементарных частиц. — М.: Аванта+, 2000.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

- Возможно ли, чтобы два одноимённо заряженных сферических проводника притягивались?
- На линии, соединяющей два одинаковых одноимённых заряда, в состоянии равновесия находится третий заряд. Может ли это равновесие быть устойчивым?
- Для того чтобы раздвинуть пластины заряженного конденсатора, необходимо приложить внешнюю силу. При этом будет совершена работа. Каков результат этой работы?

Элементы: Популярный сайт
о фундаментальной науке
<http://gotourl.ru/13728>



ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ
ПОЛЕ

Глава 9

ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

- ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК
- ЗАКОН ОМА. СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОВОДНИКА
- СОЕДИНЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ
- РАБОТА И МОЩНОСТЬ ТОКА
- ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОЛНОЙ ЦЕПИ
- РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

РАЗДЕЛ IV

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

КОРОТКО О ГЛАВНОМ...

Я полагаю, что величина передачи электричества между двумя ближайшими элементами при других равных обстоятельствах пропорциональна разности электрических сил в этих элементах, подобно тому, как в учении о теплоте принимается, что тепловая передача между двумя элементами тепла пропорциональна разности их температур.

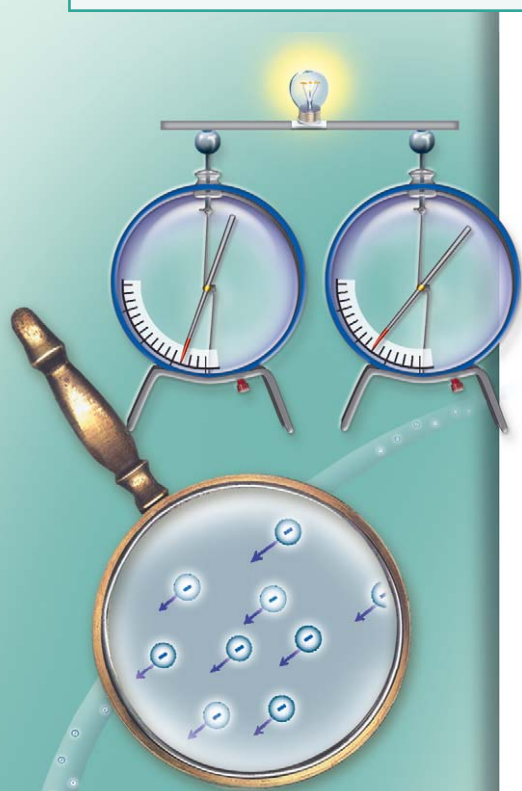
Г. Ом

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое сила тока.
- Какие действия оказывает электрический ток.
- Каковы условия существования электрического тока.
- Что такое стационарное электрическое поле.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое электрический заряд?
- Как взаимодействуют одноимённо и разноимённо заряженные тела?
- Что такое элементарный электрический заряд?



На тепловом действии тока основана работа различных нагревательных и осветительных приборов, например электрических чайников, электрических плиток, утюгов и т.п. Свечение нити накала лампы также обусловлено её нагреванием электрическим током.

В предыдущем разделе были рассмотрены электрические явления, определяемые зарядами, находящимися в состоянии статического равновесия. Однако наибольший практический интерес вызывают явления, связанные с упорядоченным движением носителей электрических зарядов — электронов и ионов.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК Из курса физики 8 класса вам уже известны некоторые сведения о том, что такое электрический ток. Вместе с тем, чтобы продолжить изучение электрических явлений на более глубоком уровне, представляется целесообразным вспомнить основные понятия, связанные с электрическим током.

Слово «ток» обозначает течение, а электрический ток — это течение, движение зарядов. Например, если зарядить один из двух одинаковых электрометров и соединить их металлическим стержнем, в который впаяна неоновая лампочка, то можно наблюдать кратковременную вспышку этой лампочки. Это означает, что по металлическому стержню прошёл электрический заряд, т.е. на короткое время возник электрический ток. Как известно, в металлах имеются свободные электроны, а в растворах солей, кислот или щелочей — положительно и отрицательно заряженные ионы. Все эти частицы могут создавать электрический ток. Следует отметить, что электрический ток возникает не при любом движении зарядов. Например, свободные электроны в металле участвуют в беспорядочном тепловом движении, при котором нет направленного переноса заряда.

Таким образом, **электрическим током называют упорядоченное (направленное) движение заряженных частиц.**

ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА О наличии электрического тока можно судить по явлениям, которые возникают при его протекании. Прежде всего необходимо отметить *тепловое действие* тока. Электрический ток, протекая по проводам, вызывает их нагревание. В этом можно убедиться, присоединив к полюсам источника тока железную или никелевую проволоку. Как показывает опыт, при пропускании тока проволока провисает, так как она нагревается и удлиняется.

Химическое действие тока способно изменять химический состав проводника. Такие явления наблюдаются при пропускании тока через растворы или расплавы электролитов. Например, пропуская ток через раствор медного купороса, можно наблюдать выделение меди на электроде.

Магнитное действие тока является основным, поскольку оно наблюдается у всех проводников. Электрический ток оказывает силовое воздействие на другие проводники с током и намагничивает железные тела. На-

пример, если на большой железный гвоздь намотать тонкий изолированный провод и концы провода через ключ присоединить к полюсам источника, то после замыкания ключа гвоздь намагнитится и будет притягивать к себе мелкие железные предметы.

СИЛА ТОКА Наличие в цепи электрического тока означает, что через площадь поперечного сечения проводника в любой момент времени переносится электрический заряд.

Для количественной характеристики электрического тока в цепи вводится понятие *силы тока*: сила тока равна отношению заряда Δq , переносимого через площадь поперечного сечения проводника за интервал времени Δt , к этому интервалу времени:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}.$$

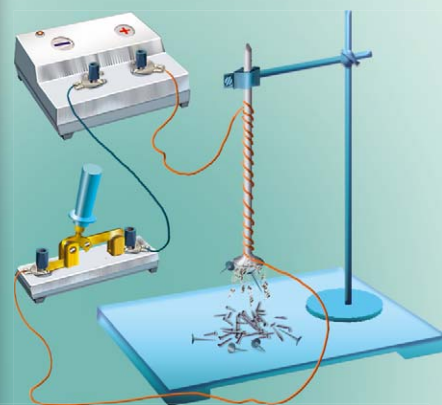
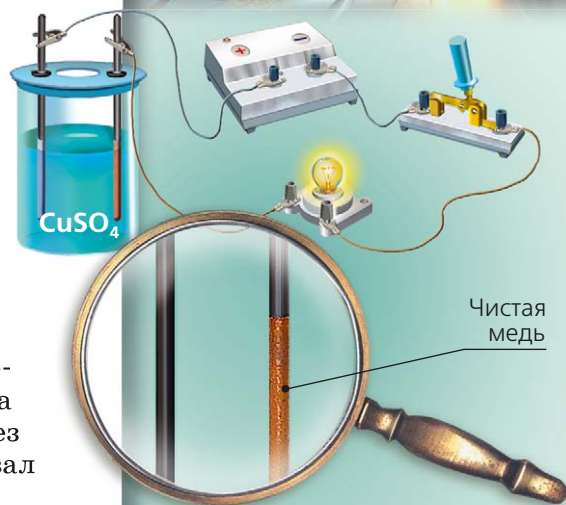
Если сила тока с течением времени не меняется, то ток называют **постоянным**. В СИ силу тока выражают в **амперах (А)**. Эта единица установлена на основе закона магнитного взаимодействия токов.

УСЛОВИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА Как уже отмечалось, для возникновения электрического тока в проводниках необходимо прежде всего наличие свободных зарядов. Связанные положительные и отрицательные заряды, входящие в состав атомов и молекул, не создают электрический ток.

Однако свободные заряды сами по себе ток создать не могут. Для возникновения тока необходимо, чтобы эти заряды пришли в упорядоченное движение. А это возможно только в том случае, если на заряды будет действовать электрическая сила. Если эта сила перестанет действовать, то упорядоченное движение заряженных частиц, например электронов в металлах, быстро прекратится из-за сопротивления, оказываемого их движению ионами кристаллической решётки.

Электрическая сила возникает в результате действия на заряды электрического поля: $\vec{F} = q\vec{E}$. Следовательно, **причиной возникновения и поддержания упорядоченного движения заряженных частиц в проводнике является электрическое поле**. Но поскольку между напряжённостью однородного электрического поля и напряжением имеется простая взаимосвязь: $U = Ed$, то это означает **существование разности потенциалов между началом и концом проводника, по которому протекает электрический ток**.

Следует подчеркнуть, что движущиеся заряды влияют на формирование электрического поля проводника, поэтому это поле не является электростатическим. Его называют **стационарным, т.е. не зависящим от времени, электрическим полем**.



Силу тока в электрических цепях измеряют с помощью амперметров, работа которых основана на магнитном действии тока. Чем больше сила тока, протекающего по катушке прибора, тем сильнее она взаимодействует с магнитом и тем больше угол поворота стрелки амперметра.

ВОПРОСЫ:

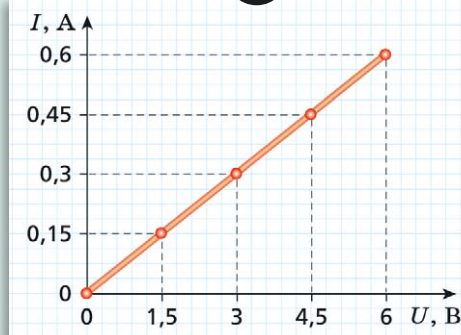
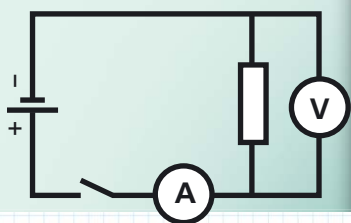
- Что такое электрический ток?
- Какие действия тока вы знаете?
- Что называют силой тока в цепи?
- Какие условия необходимы для возникновения и поддержания электрического тока?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое вольт-амперная характеристика проводника.
- От каких параметров зависит сопротивление проводника.
- Что такое удельное сопротивление проводника.

ВСПОМНИТЕ:

- Из каких элементов состоит электрическая цепь?
- Что такое закон Ома?
- Что такое сопротивление проводника?



Георг Симон Ом
(1787—1854)

Немецкий физик, установил основной закон электрической цепи, названный его именем.

ЗАКОН ОМА. СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОВОДНИКА

С законом Ома для участка цепи вы впервые познакомились в курсе физики 8 класса. Закон Ома относится к числу наиболее важных законов физики, поэтому, прежде чем обсуждать обобщение этого закона для полной цепи, необходимо вспомнить его основные положения.

ЗАВИСИМОСТЬ СИЛЫ ТОКА ОТ НАПРЯЖЕНИЯ Для проверки этой зависимости соберём цепь, состоящую из источника регулируемого напряжения, резистора, амперметра, вольтметра и ключа. Изменяя напряжение источника, будем снимать показания приборов и записывать их в таблицу. Используя эти данные, построим график зависимости силы тока через резистор от напряжения на нём. Эта зависимость называется **вольт-амперной характеристикой резистора**. Как видно из графика, во сколько раз увеличивается напряжение на участке цепи, во столько же раз увеличивается и сила тока на этом участке: $I \sim U$.

ЗАКОН ОМА Сила тока на участке цепи зависит не только от напряжения, но и от сопротивления этого участка. Взаимосвязь силы тока, напряжения и сопротивления была установлена в 1827 г. немецким физиком Г.Омом: **сила тока на участке цепи прямо пропорциональна напряжению на концах этого участка и обратно пропорциональна его сопротивлению:**

$$I = U/R. \quad (1)$$

Закон Ома справедлив только для проводников, у которых сопротивление не зависит от приложенного напряжения и силы тока. Такими проводниками являются металлы, уголь и электролиты. Сопротивление газов зависит от приложенного напряжения, поэтому для газов закон Ома не выполняется.



Интересно, что более чем на 50 лет раньше Ома пропорциональность силы тока напряжению была установлена английским учёным Г.Кавендишем. Однако большинство своих работ Кавендиш не опубликовал, а экспериментировал в основном из собственного любопытства.

СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОВОДНИКА Как показывают опыты, сила тока в цепи зависит от свойств проводников, включённых в эту цепь. Это означает, что разные проводники оказывают различное сопротивление движению зарядов. Причина появления сопротивления обусловлена взаимодействием движущихся электронов с положительными ионами кристаллической решётки металла. Это приводит к уменьшению переносимого за 1 с заряда, т.е. к уменьшению силы тока в цепи. Кроме того, в результате взаимо-

действия зарядов усиливается беспорядочное колебательное движение ионов решётки, что приводит к увеличению температуры проводника. Энергия движущихся зарядов превращается во внутреннюю энергию проводника.

Зависимость сопротивления проводника от его длины можно установить, если собрать цепь, состоящую из источника тока, амперметра, ключа и нихромовой проволоки, снабжённой скользящим контактом. Перемещая контакт по проволоке, можно изменять длину проводника, включённого в цепь. Так, при увеличении длины проводника, например, в 2 раза показание амперметра уменьшается в 2 раза. Это означает, что сопротивление проводника прямо пропорционально его длине: $R \sim l$.

Зависимость сопротивления проводника от его длины объясняется тем, что работа сил электрического поля в проводнике по перемещению зарядов также зависит от длины проводника: чем длиннее будет проводник, тем большую работу придётся совершить силам стационарного электрического поля.

Если продолжить опыты, то нетрудно убедиться в том, что сила тока зависит также и от площади поперечного сечения проводника. Если в цепь включить нихромовую проволоку такой же длины, как и в предыдущем опыте, но вдвое большего поперечного сечения, то амперметр покажет вдвое большую силу тока. Это означает, что сопротивление проводника обратно пропорционально площади его поперечного сечения: $R \sim 1/S$.

Уменьшение сопротивления проводника при увеличении площади поперечного сечения объясняется тем, что в этом случае возрастает число носителей тока на единичной длине проводника. Поэтому при неизменной разности потенциалов на концах проводника это приведёт к увеличению силы тока, что в соответствии с формулой (1) следует трактовать как уменьшение сопротивления проводника. Таким образом, сопротивление проводника

$$R = \rho l / S. \quad (2)$$

Коэффициент пропорциональности ρ отражает зависимость сопротивления от свойств материала, из которого изготовлен проводник, и называется **удельным сопротивлением проводника**. Удельное сопротивление численно равно сопротивлению проводника длиной 1 м и площадью поперечного сечения 1 мм². Поскольку единица сопротивления установлена на основе закона Ома (1) и называется омом, то единицей удельного сопротивления является *ом-метр* (Ом·м).



Ом в своих опытах в качестве источника тока использовал так называемую термопару, представляющую собой соединение разнородных металлов, концы спаев которых поддерживались при разных температурах. Существовавшие в то время гальванические батареи не могли создавать постоянный электрический ток в течение длительного времени.

Если обозначить величины:
сопротивление проводника — R , его удельное сопротивление — ρ , длина проводника — l , площадь его поперечного сечения — S , то

$$R = \rho l / S.$$

Из всех металлов наименьшим удельным сопротивлением обладают серебро и медь. Это лучшие проводники электричества. Такие диэлектрики, как фарфор и эбонит, имеют столь большое удельное сопротивление, что практически не проводят электрический ток.

Совсем недавно на основе графита был создан новый материал — графен, представляющий собой слой углерода толщиной всего в один атом (двумерный кристалл). Этот материал характеризуется рядом особенных свойств. В частности, при обычных условиях графен обладает рекордно высокой электрической проводимостью.

ВОПРОСЫ:

- Как формулируется закон Ома для участка цепи?
- От каких характеристик проводника зависит его сопротивление?
- Что такое удельное сопротивление проводника?
- Каковы физические причины зависимости сопротивления проводника от его длины и площади поперечного сечения?

СОЕДИНЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Какие условия для силы тока и напряжения выполняются при последовательном соединении проводников.
- Как находят общее сопротивление цепи, состоящей из последовательно соединённых проводников.
- Какие условия для силы тока и напряжения выполняются при параллельном соединении проводников.
- Как находят общее сопротивление цепи, состоящей из параллельно соединённых проводников.

ВСПОМНИТЕ:

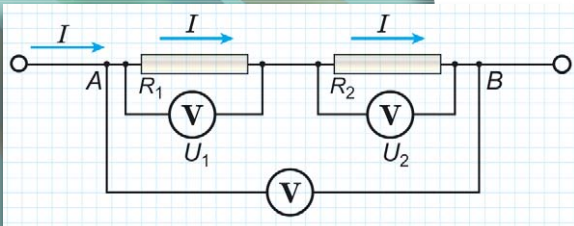
- Что такое электрическая цепь?
- Что такое сила тока и напряжение?
- Что такое сопротивление проводника?
- Как можно записать закон Ома для участка цепи?

При **последовательном соединении** проводников **сила тока** в любых участках цепи одинакова:

$$I = I_1 = I_2.$$

Общее напряжение цепи равно сумме напряжений на её отдельных участках:

$$U = U_1 + U_2.$$



При **последовательном соединении** проводников **общее сопротивление** цепи равно сумме сопротивлений отдельных проводников:

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n.$$

Электрические цепи, состоящие только из источника, одного резистора и измерительных приборов (амперметра и вольтметра), являются достаточно простыми. Такие цепи на практике используются редко. Значительно чаще электрические цепи содержат несколько потребителей (нагрузок), соединённых между собой тем или иным способом.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ

Соединение, при котором проводники включаются в цепь поочередно друг за другом без разветвления проводов между ними, называется **последовательным**.

В качестве примера рассмотрим два последовательно соединённых проводника, сопротивления которых равны R_1 и R_2 . При таком способе соединения сила тока в обоих проводниках одинакова, поскольку в месте соединения проводников заряд не накапливается и через любое сечение проводника за определённое время проходит один и тот же заряд:

$$I = I_1 = I_2. \quad (1)$$

Работа по перемещению заряда q по всему участку AB цепи равна сумме работ на участках, содержащих проводники сопротивлениями R_1 и R_2 : $A_1 = qU_1$, $A_2 = qU_2$, $A = A_1 + A_2 = q(U_1 + U_2)$. С другой стороны, $A = qU$, где U — общее напряжение на участке AB . Следовательно,

$$U = U_1 + U_2. \quad (2)$$

Этот результат является следствием закона сохранения энергии. Действительно, работа по перемещению заряда по всему участку AB цепи равна сумме работ на участках, содержащих проводники сопротивлениями R_1 и R_2 . Сама же работа совершается за счёт энергии движущихся зарядов.

Если обозначить общее сопротивление участка AB цепи через R , то согласно закону Ома имеем

$$U = IR. \quad (3)$$

Но с учётом равенств (1) и (2) можно записать:

$$U = IR_1 + IR_2 = I(R_1 + R_2). \quad (4)$$

Сравнение правых частей равенств (3) и (4) позволяет записать:

$$R = R_1 + R_2. \quad (5)$$

Общее сопротивление участка цепи при последовательном соединении проводников равно сумме сопротивлений отдельных проводников.

ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ

Другим способом соединения проводников является **параллельное соединение**, при котором все проводники, включённые в цепь, имеют общее начало и общий конец.

В качестве примера рассмотрим параллельное соединение двух проводников сопротивлениями R_1 и R_2 . При таком способе соединения проводников ток I , текущий по цепи, в точке A разветвляется на два тока — I_1 и I_2 . Ток I_1 течёт через проводник сопротивлением R_1 , а ток I_2 — через проводник сопротивлением R_2 .

Поскольку в точке A цепи (узел A) заряд не накапливается, то заряд, поступающий в единицу времени в этот узел, равен заряду, выходящему из него за то же время. Поэтому

$$I = I_1 + I_2, \quad (6)$$

т.е. сила тока в неразветвлённой части цепи равна сумме сил токов в отдельных проводниках.

Так как оба проводника подключены к одним и тем же точкам A и B цепи, то, очевидно, напряжение на проводниках одно и то же:

$$U = U_1 = U_2. \quad (7)$$

Согласно закону Ома

$$I = \frac{U}{R},$$

где R — полное сопротивление участка AB цепи; U — общее напряжение на этом участке.

С учётом формулы (6) можно записать:

$$\frac{U}{R} = \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2}.$$

Учитывая равенство (7), последнюю формулу можно переписать:

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}.$$

Следовательно,

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}. \quad (8)$$

Таким образом, в случае двух проводников, соединённых параллельно, формула (8) позволяет вычислить общее сопротивление участка цепи:

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (9)$$

Равенство (7) позволяет также установить соответствие

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}, \quad (10)$$

т.е. *силы токов при параллельном соединении обратно пропорциональны сопротивлениям проводников.*

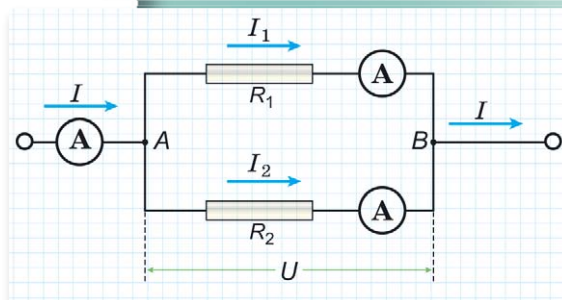
Следует отметить, что на практике параллельное соединение является самым распространённым способом соединения различных потребителей. В этом случае нарушение работы одного из потребителей не влияет на работу других.

При **параллельном соединении** проводников **сила тока** в неразветвлённой части цепи равна сумме сил токов в параллельно соединённых проводниках:

$$I = I_1 + I_2.$$

Напряжение на всех параллельно соединённых проводниках одинаково:

$$U = U_1 = U_2.$$



При **параллельном соединении** проводников **общее сопротивление** цепи можно вычислить по формуле

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

- Какие условия выполняются для силы тока и напряжения при последовательном соединении проводников?
- По какой формуле находят общее сопротивление цепи при последовательном соединении проводников?
- Какие условия выполняются для силы тока и напряжения при параллельном соединении проводников?
- По какой формуле находят общее сопротивление цепи при параллельном соединении проводников?
- Найдите общее сопротивление цепи, состоящей из n одинаковых параллельно соединённых проводников. Сопротивление каждого проводника равно R .

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как вычисляют работу электрического тока.
- В чём заключается закон Джоуля—Ленца.
- Как вычисляют мощность электрического тока.
- В каких единицах обычно измеряют затраты электрической энергии.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое напряжение на участке цепи?
- В чём заключается закон Ома?
- Что такое мощность и как она связана с работой?

Если обозначить величины: напряжение на участке цепи — U , время протекания тока — Δt , сила тока — I , то работу электрического тока за время Δt рассчитывают по формуле

$$A = UI\Delta t.$$



Эмилий Христианович Ленц
(1804—1865)

Российский физик. Основные работы относятся к области электричества и магнетизма.

Если обозначить величины: количество теплоты, выделяемое проводником с током, — Q , сила тока — I , сопротивление проводника — R , время протекания тока — Δt , то закон Джоуля—Ленца выражают по формуле

$$Q = I^2 R \Delta t.$$

При упорядоченном движении заряженных частиц в электрической цепи неизбежно происходит ряд превращений энергии, обусловленных действиями тока. Например, это могут быть разного рода химические реакции либо магнитное или механическое действие тока. Однако в большинстве случаев наблюдается превращение энергии движущихся зарядов во внутреннюю энергию проводника.

РАБОТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА При движении зарядов в проводнике силы электрического поля совершают работу. Пусть за время Δt через площадь поперечного сечения проводника проходит заряд q . Если учесть, что напряжение на участке цепи определяется отношением работы A электрических сил по перемещению заряда q к значению этого заряда $U = A/q$, то выражение для работы можно записать в виде

$$A = Uq = UI\Delta t. \quad (1)$$

Таким образом, **работа электрического тока на участке цепи равна произведению напряжения на этом участке на силу тока и на время, в течение которого протекал ток**. Поскольку единицей работы является джоуль (Дж), то согласно формуле (1) $1 \text{ Дж} = 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с}$.

ЗАКОН ДЖОУЛЯ—ЛЕНЦА Увеличение внутренней энергии проводника определяется количеством теплоты, которое в нём выделяется. Нагревание проводника объясняется столкновениями движущихся электронов с ионами кристаллической решётки, которым электроны передают часть своей энергии. Это приводит к тому, что энергия колебаний ионов относительно положений равновесия увеличивается. При этом температура проводника начнёт возрастать, в результате чего окружающим телам будет передаваться некоторое количество теплоты Q .

Если при протекании тока не совершается механическая работа, то согласно закону сохранения энергии количество теплоты Q , выделяемое проводником с током, равно работе тока A :

$$Q = A.$$

С учётом формулы (1) и согласно закону Ома $U = IR$ получаем

$$Q = IRI\Delta t = I^2 R \Delta t. \quad (2)$$

Формулой (2) удобно пользоваться при последовательном соединении проводников, поскольку сила тока в этом случае одинакова во всех проводниках.

При параллельном соединении проводников напряжение на их концах одинаково, поэтому удобнее пользоваться формулой

$$Q = \frac{U^2}{R} \Delta t. \quad (3)$$

Закон, выражаемый по формуле (2), был впервые установлен экспериментально английским учёным Д. Джоулем и российским учёным Э. Ленцем: **количество теплоты, выделяемое проводником с током, равно произведению квадрата силы тока, сопротивления проводника и времени протекания тока по проводнику.**

МОЩНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА Как известно, любой электрический прибор: лампа, утюг и т.п. — рассчитан на потребление определённой энергии в единицу времени. Это означает, что каждая нагрузка рассчитана на потребление той или иной электрической мощности.

Как и в механике, электрическая мощность — это физическая величина, характеризующая быстроту совершения работы электрическим током. Эту величину принято обозначать буквой P :

$$P = \frac{A}{\Delta t}.$$

С учётом формулы (1) для работы тока получим

$$P = \frac{UI\Delta t}{\Delta t} = UI, \quad (4)$$

т.е. **мощность электрического тока равна произведению напряжения на силу тока в цепи.**

Формулу (4) для мощности можно записать в несколько ином виде, если учесть закон Ома для участка цепи $U = IR$:

$$P = I^2 R = \frac{U^2}{R}. \quad (5)$$

ЕДИНИЦЫ РАБОТЫ И МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Поскольку в СИ единицей мощности является ватт (Вт), то в соответствии с формулой (4) $1 \text{ Вт} = 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ А}$. Следовательно, работу электрического тока можно измерять в единицах произведения $\text{Вт} \cdot \text{с}$, т.е. в джоулях. Однако эту единицу работы неудобно использовать на практике, так как работа тока обычно совершается в течение длительного времени. Поэтому при расчётах затрат электрической энергии используют внесистемную единицу работы: **ватт-час** ($\text{Вт} \cdot \text{ч}$) или **киловатт-час** ($\text{кВт} \cdot \text{ч}$):

$$1 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 3600 \text{ Дж}.$$



Один из основоположников термодинамики английский учёный У. Томсон (Кельвин) в 1856 г. открыл так называемый термоэлектрический эффект: когда по проводнику пропускают электрический ток и при этом начало и конец проводника поддерживают при разных температурах, то, кроме джоулева тепла, в нём выделяется или поглощается (в зависимости от направления тока) ещё некоторое количество теплоты.

Известно, что Джоуль до открытия закона, впоследствии названного его именем, занимался изучением эффективности электрических машин, в частности электромагнитов. Первоначально он полагал, что электромагниты могут быть источниками сколь угодно большого количества механической работы. Однако проведённые Джоулем опыты убедили его в том, что это не так. Это привело Джоуля к пессимистическому выводу о преимуществе паровых машин над электрическими.

Если обозначить величины: напряжение на участке цепи — U , сила тока — I , то мощность тока на данном участке вычисляют по формуле

$$P = UI.$$

При последовательном соединении проводников для вычисления мощности удобнее пользоваться формулой

$$P = I^2 R.$$

При параллельном соединении проводников удобнее пользоваться формулой

$$P = \frac{U^2}{R}.$$

ВОПРОСЫ:

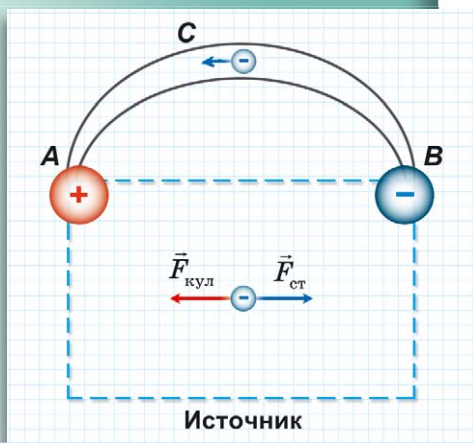
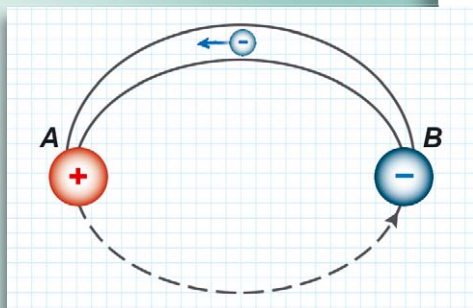
- Почему при протекании тока по проводнику происходит его нагревание?
- Как формулируется закон Джоуля–Ленца?
- По каким формулам вычисляют работу и мощность тока?
- Зависит ли мощность, потребляемая нагрузками, от способа их включения в электрическую цепь?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое источник тока.
- Что такое электродвижущая сила источника.
- Как можно записать закон Ома для полной цепи.
- Что такое сторонние силы.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое электрическая цепь?
- Что такое кулоновские силы?
- Что такое разность потенциалов?
- Каковы условия существования электрического тока?



ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОЛНОЙ ЦЕПИ

Как вы знаете, в проводниках при протекании тока движущиеся заряженные частицы испытывают сопротивление из-за взаимодействия с неподвижными зарядами проводника. Это приводит к уменьшению кинетической энергии движущихся зарядов. Поэтому для поддержания в цепи постоянной силы тока необходимо пополнять запас энергии движущихся частиц, что невозможно без совершения работы за счёт энергии каких-либо источников.

ИСТОЧНИК ТОКА. СТОРОННИЕ СИЛЫ

Пусть в нашем распоряжении имеются два проводящих тела, заряженные равными по модулю, но противоположными по знаку зарядами. Например, это могут быть пластины заряженного конденсатора. Если тела *A* и *B* соединить проводником *C*, то в проводнике возникнет кратковременный ток. Ток прекратится в результате выравнивания потенциалов тел *A* и *B*, что приведёт к исчезновению электрического поля в проводнике.

Таким образом, заряженные тела неспособны длительное время поддерживать электрическое поле внутри проводника. Для создания и поддержания тока существуют специальные устройства — **источники тока**.

В источнике за счёт разного рода неэлектростатических причин происходит процесс разделения разноимённых зарядов, в результате чего на полюсах источника накапливаются заряды противоположных знаков, а между полюсами устанавливается определённая разность потенциалов.

Для того чтобы ток в проводнике *C* не прекращался, необходимо, чтобы электроны проводимости, перемещающиеся с тела *B* на тело *A*, вновь возвращались на тело *B*. Однако для этого электроны должны двигаться против действующих на них кулоновских сил со стороны положительных зарядов тела *A*. Очевидно, что осуществить это электростатические силы не могут. Поэтому на заряды, кроме электростатических сил, должны действовать другие силы, направленные противоположно кулоновским силам.

Такие силы неэлектростатического происхождения получили название **сторонних сил**. Под действием этих сил заряды внутри источника движутся против кулоновских сил (отрицательные заряды — от плюса к минусу), тогда как по внешнему участку цепи (проводник *C*) они движутся под действием электрического поля, порождаемого зарядами, которые накапливаются на полюсах источника тока.

Природа сторонних сил может быть различной. Например, в гальванических элементах и аккумуляторах это химические силы, в генераторах электростанций —

это сила, которая действует со стороны магнитного поля на электроны в движущихся проводниках.

ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА ИСТОЧНИКА Основной характеристикой источника тока является важная физическая величина, называемая **электродвижущей силой** (сокращённо ЭДС, обозначается $\mathcal{E}$). Электродвижущая сила определяется отношением работы сторонних, т.е. неэлектростатических, сил по перемещению заряженных частиц внутри источника тока к заряду этих частиц:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}. \quad (1)$$

Работа $A_{\text{ст}}$ определяет энергетические затраты на разделение зарядов сторонними силами внутри источника. Если полюсы источника не замкнуты проводником, то между ними имеется разность потенциалов, равная электродвижущей силе источника.

ЭДС источника выражается в вольтах.

ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОЛНОЙ ЦЕПИ Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из источника (гальванического элемента или аккумулятора) и резистора сопротивлением R . Обозначим ЭДС источника буквой $\mathcal{E}$, а его внутреннее сопротивление буквой r . При рассмотрении процессов, происходящих в замкнутой цепи, используем закон Джоуля—Ленца и закон сохранения энергии.

Если за время Δt через поперечное сечение проводника прошёл заряд Δq , то точно такой же заряд переместился и внутри источника. При этом сторонние силы совершили работу $A_{\text{ст}} = \mathcal{E}\Delta q$. Заряд Δq выразим через силу тока I и время протекания: $\Delta q = I\Delta t$. Следовательно,

$$A_{\text{ст}} = \mathcal{E}I\Delta t. \quad (2)$$

Результатом работы сторонних сил является выделение некоторого количества теплоты внутри источника и на внешнем участке цепи. Согласно закону Джоуля—Ленца это количество теплоты равно:

$$Q = I^2 R \Delta t + I^2 r \Delta t. \quad (3)$$

По закону сохранения энергии $A_{\text{ст}} = Q$. С учётом формул (2) и (3) получим

$$\mathcal{E} = IR + Ir. \quad (4)$$

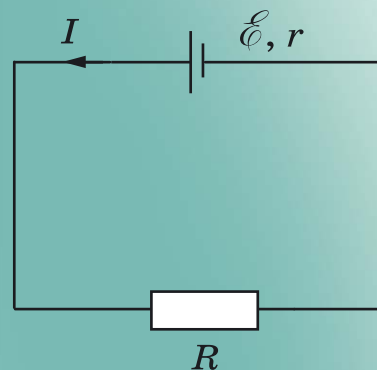
При расчётах характеристик электрических цепей напряжение на участке цепи часто называют падением напряжения на данном участке. Поэтому формула (4) показывает, что ЭДС источника равна сумме падений напряжений на внутреннем и внешнем участках замкнутой цепи. Закон Ома для полной цепи можно также записать в несколько ином виде:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}. \quad (5)$$

Таким образом, *сила тока в полной цепи равна отношению ЭДС источника к полному сопротивлению цепи.*

Если обозначить величины: электродвижущая сила — $\mathcal{E}$, работа сторонних сил — $A_{\text{ст}}$, переместившийся заряд — q , то ЭДС источника выражают по формуле

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}.$$



Если обозначить величины: сила тока в цепи — I , ЭДС источника — $\mathcal{E}$, внутреннее сопротивление источника — r , сопротивление внешнего участка цепи — R , то закон Ома для полной цепи можно записать в виде формулы

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}.$$

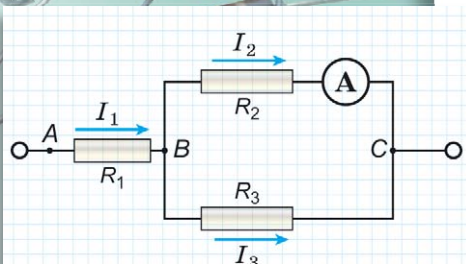
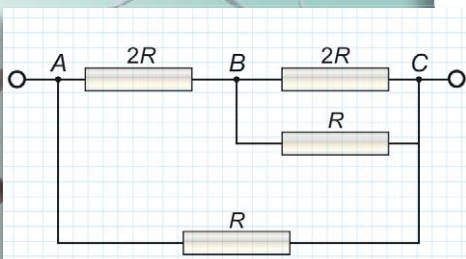
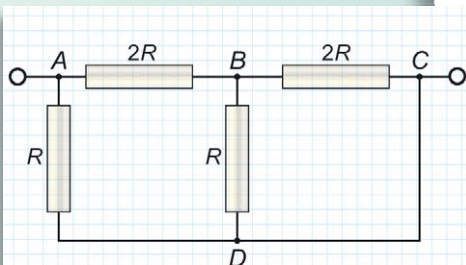
ВОПРОСЫ:

- Какие силы называют сторонними? Какую роль они выполняют в источнике тока?
- Что такое электродвижущая сила?
- Как можно записать закон Ома для полной цепи?

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как решать задачи на расчёт сопротивления участка цепи.
- Как решать задачи на закон Ома для участка цепи.
- Как решать задачи на расчёт мощности на участке цепи.
- Как решать задачи на применение закона Ома для полной цепи.



ЗАДАЧА 1 Найдите общее сопротивление цепи, состоящей из резисторов R и $2R$, если сопротивление $R = 10 \text{ Ом}$.

Дано:
 $R = 10 \text{ Ом}$

$R_{\text{общ}} = ?$

Решение:

На первый взгляд из-за наличия узловых точек в цепи нет ни последовательно, ни параллельно соединённых резисторов. Однако это не так. Если узлы D и C соединить в один узел, то сопротивление в цепи не изменится, так как линии, соединяющие эти узлы, не обладают сопротивлением. Полученная цепь содержит параллельно и последовательно соединённые участки. Находим сопротивление участка BC цепи, содержащего два параллельно соединённых резистора R и $2R$: $R_{BC} = \frac{2R \cdot R}{2R + R} = \frac{2}{3}R$.

Сопротивление участка цепи между узлами A и C

$$R_{AC} = 2R + R_{BC} = \frac{8}{3}R.$$

Так как участок AC параллельно соединён с резистором R , то общее сопротивление цепи

$$R_{\text{общ}} = \frac{R_{AC} \cdot R}{R_{AC} + R} = \frac{\frac{8}{3}R \cdot R}{\frac{8}{3}R + R} = \frac{8}{11}R \approx 7,3 \text{ Ом}.$$

Ответ: $R_{\text{общ}} \approx 7,3 \text{ Ом}$.

ЗАДАЧА 2 Найдите напряжение на участке AC цепи, если сопротивления проводников $R_1 = R_2 = 5 \text{ Ом}$, $R_3 = 10 \text{ Ом}$, а амперметр, включённый последовательно с проводником сопротивлением R_2 , показывает силу тока $I_2 = 1 \text{ А}$.

Дано:
 $R_1 = 5 \text{ Ом}$
 $R_2 = 5 \text{ Ом}$
 $R_3 = 10 \text{ Ом}$
 $I_2 = 1 \text{ А}$

$U_{AC} = ?$

Решение:

Обозначим токи, протекающие через проводники, I_1 , I_2 , I_3 . Проводники R_2 и R_3 соединены параллельно, поэтому напряжение на них одинаково: $U_{BC} = I_2 R_2 = I_3 R_3$.

Следовательно, $I_3 = I_2 \frac{R_2}{R_3} = 0,5 \text{ А}$.

Поскольку заряд, поступающий в единицу времени в узел B , не накапливается, то он разделяется в этом узле на заряды, которые перемещаются через проводники R_2 и R_3 . Сила тока, протекающего через проводник R_1 , равна сумме сил токов, протекающих через проводники R_2 и R_3 : $I_1 = I_2 + I_3 = 1,5 \text{ А}$.

Согласно закону Ома для участка цепи

$$U_{AB} = I_1 R_1 = 1,5 \text{ А} \cdot 5 \text{ Ом} = 7,5 \text{ В}.$$

На проводниках R_2 и R_3 $U_{BC} = 1 \text{ А} \cdot 5 \text{ Ом} = 5 \text{ В}$. Получим

$$U_{AC} = U_{AB} + U_{BC} = 12,5 \text{ В}.$$

Ответ: $U_{AC} = 12,5 \text{ В}$.

ЗАДАЧА 3 На цоколе одной лампочки написано: 60 Вт, 220 В, а на цоколе другой — 100 Вт, 220 В. Лампочки соединяют последовательно и включают в сеть напряжением 220 В. Какая мощность будет выделяться в каждой лампочке?

Дано:

$$P_1 = 60 \text{ Вт}$$

$$P_2 = 100 \text{ Вт}$$

$$U = 220 \text{ В}$$

$$P'_1 = ?$$

$$P'_2 = ?$$

Решение:

Из формулы для мощности $P = \frac{U^2}{R}$ находим

сопротивление каждой лампочки:

$$R_1 = \frac{U^2}{P_1} \approx 807 \text{ Ом}; \quad R_2 = \frac{U^2}{P_2} = 484 \text{ Ом}.$$

Поскольку лампочки соединены последовательно, то их общее сопротивление

$$R = R_1 + R_2 = 1291 \text{ Ом}.$$

По закону Ома находим силу тока, протекающего через лампочки:

$$I = \frac{U}{R} = 0,17 \text{ А}.$$

По формуле $P = I^2 R$ находим мощность, выделяющуюся на каждой лампочке:

$$P'_1 = I^2 R_1 \approx 23 \text{ Вт}; \quad P'_2 = I^2 R_2 \approx 14 \text{ Вт}.$$

Ответ: $P'_1 \approx 23 \text{ Вт}$; $P'_2 \approx 14 \text{ Вт}$.

ЗАДАЧА 4 При подключении к аккумулятору проводника сопротивлением 10 Ом сила тока в цепи равна 1 А, а при подключении проводника сопротивлением 5 Ом сила тока в цепи оказалась равной 1,5 А. Найдите ЭДС и внутреннее сопротивление аккумулятора.

Дано:

$$R_1 = 10 \text{ Ом}$$

$$I_1 = 1 \text{ А}$$

$$R_2 = 5 \text{ Ом}$$

$$I_2 = 1,5 \text{ А}$$

$$\mathcal{E} = ?$$

$$r = ?$$

Решение:

Для каждого случая запишем закон Ома для полной цепи:

$$I_1 = \frac{\mathcal{E}}{R_1 + r}; \quad I_2 = \frac{\mathcal{E}}{R_2 + r}.$$

Исключив из этих равенств ЭДС $\mathcal{E}$, получим

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2 + r}{R_1 + r}.$$

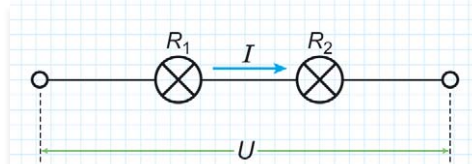
Из последней формулы находим внутреннее сопротивление аккумулятора:

$$r = \frac{I_1 R_1 - I_2 R_2}{I_2 - I_1} = 5 \text{ Ом}.$$

Учитывая, что $\mathcal{E} = I_1(R_1 + r)$, получаем после подстановки значения r

$$\mathcal{E} = 1 \text{ А} \cdot (10 \text{ Ом} + 5 \text{ Ом}) = 15 \text{ В}.$$

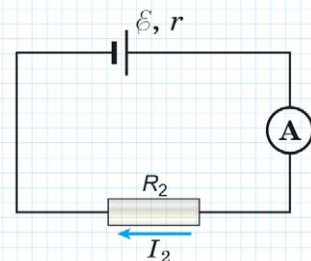
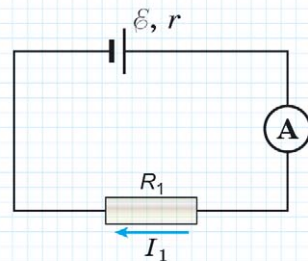
Ответ: $\mathcal{E} = 15 \text{ В}$; $r = 5 \text{ Ом}$.



Если полюсы источника тока соединить проводником, сопротивление которого ничтожно мало по сравнению с внутренним сопротивлением источника, то возникший при этом ток называется **током короткого замыкания**:

$$I_{\text{к.з.}} = \frac{\mathcal{E}}{r}.$$

Ток короткого замыкания опасен для источников, обладающих сравнительно малым, порядка 0,01—0,1 Ом, внутренним сопротивлением. В этих случаях сила тока может достигать нескольких десятков и даже сотен ампер. Такие токи способны разрушить сам источник.





ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

- Электрическим током называют упорядоченное движение заряженных частиц под действием электрического поля.
- Сила тока — это физическая величина, которая показывает, какой электрический заряд проходит через площадь поперечного сечения проводника за единицу времени.
- Закон Ома: сила тока на участке цепи прямо пропорциональна напряжению на концах этого участка и обратно пропорциональна его сопротивлению.
- Сопротивление проводника не зависит от значений тока и напряжения, а определяется его геометрическими размерами и зависит от материала, из которого проводник изготовлен.
- Основной характеристикой источника тока является физическая величина, которая называется электродвижущей силой и определяется отношением работы сторонних сил по перемещению заряженных частиц внутри источника тока к заряду этих частиц.
- Закон Ома для полной цепи: сила тока в полной цепи равна отношению ЭДС источника к полному сопротивлению цепи.
- Различают последовательное и параллельное соединения элементов электрической цепи.

$$I = \frac{U}{R}$$

ЗАКОН ОМА
для участка ЦЕПИ

$$I = I_1 = I_2$$

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad U = U_1 + U_2$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad I = I_1 + I_2$$

$$U = U_1 = U_2$$

ПОДРОБНЕЕ...

Беркинблит М.Б., Глаголева Е.Г. Электричество в живых организмах. Вып. 69. / М.Б. Беркинблит, Е.Г. Глаголева. — М.: Наука, 1988. — (Библиотечка «Квант»).

Суорц Кл.Э. Необыкновенная физика обыкновенных явлений. Т. 2. / Кл.Э. Суорц. — М.: Наука, 1987.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

- Так как ток течёт от большего потенциала к меньшему, то движение зарядов должно приводить к выравниванию потенциалов. Однако на самом деле этого не происходит. Почему?
- При каком условии напряжение, измеренное на полюсах источника тока, можно считать равным ЭДС источника?
- Почему электрические лампы накаливания перегорают, как правило, в момент замыкания цепи и редко — в момент размыкания?

Политехнический музей
<http://gotourl.ru/13731>

Универсальная научно-популярная энциклопедия
Кругосвет
<http://gotourl.ru/13735>



Глава 10

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

- ПРИРОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В МЕТАЛЛАХ
- ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ЭЛЕКТРОЛИТАХ
- ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ГАЗАХ
- ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ВАКУУМЕ
- ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

РАЗДЕЛ IV

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

КОРОТКО О ГЛАВНОМ...

Таким образом, металлы не только прекрасные проводники, но и двигатели электричества; они не только предоставляют легчайший путь прохождению электрического флюида... но сами же вызывают такое нарушение равновесия тем, что извлекают этот флюид и вводят его, подобно тому как это происходит при натирании диэлектриков.

А. Вольт

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- На основе каких опытов было установлено, что ток в металлах создают электроны.
- Как сила тока в проводнике зависит от средней скорости направленного движения зарядов.
- Как удельное сопротивление металлов зависит от температуры.
- В чём заключается явление сверхпроводимости.

ВСПОМНИТЕ:

- Какие заряды называются свободными?
- Чем объясняется сопротивление металлов протеканию электрического тока?
- Что такое удельное сопротивление?

ПРИРОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В МЕТАЛЛАХ

Для того чтобы выяснить природу электрического тока в той или иной среде, необходимо прежде всего установить, какие именно заряженные частицы участвуют в переносе электрического заряда.

ПРИРОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В МЕТАЛЛАХ Научно обоснованные представления о природе электрического тока в металлических проводниках были сформулированы в начале XX в., поскольку к этому времени уже было известно о кристаллическом строении металлов.

Прямое доказательство того, что ток в металлах создают электроны, оторвавшиеся от своих атомов (свободные электроны), было получено в опытах, поставленных в 1913 г. российскими физиками Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси и в 1916 г. английскими физиками Р. Толменом и Б. Стюартом. В основе этих опытов лежало предположение о том, что если металлический проводник привести в движение, а затем резко затормозить, то свободные электроны будут по инерции продолжать движение относительно кристаллической решётки.

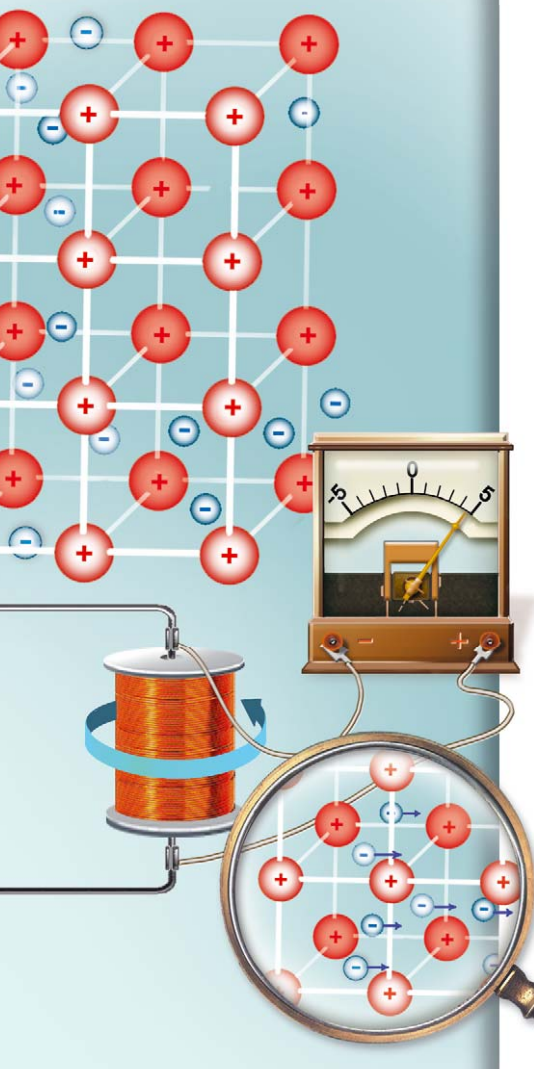
Роль проводника в этих опытах выполняла катушка с намотанной на неё проволокой, концы которой припаивались к металлическим дискам. Диски посредством скользящих контактов соединялись с чувствительным гальванометром. Катушку приводили в быстрое вращение, а затем резко останавливали. Отклонение стрелки гальванометра при торможении катушки свидетельствовало о возникновении в проводнике кратковременного тока. Направление отклонения стрелки прибора позволило установить, что ток создаётся движением именно отрицательно заряженных частиц.

Данные опыты позволили также установить, что переносимый через гальванометр заряд пропорционален отношению заряда частицы к её массе: $|q_0|/m$. Это отношение оказалось равным отношению модуля заряда электрона к его массе: $|e|/m = 1,8 \cdot 10^{11}$ Кл/кг, полученному ранее американским физиком Р. Милликеном.

СРЕДНЯЯ СКОРОСТЬ УПОРЯДОЧЕННОГО ДВИЖЕНИЯ

ЭЛЕКТРОНОВ Если в металлическом проводнике создать электрическое поле, то на свободные электроны будет действовать электрическая сила, в результате чего возникнет направленное движение зарядов, т.е. потечёт электрический ток.

Установим взаимосвязь между силой тока в проводнике и средней скоростью упорядоченного движения $\bar{v}$ электронов. Если через S обозначить площадь поперечного сечения проводника, то в единицу времени через неё будет проходить $nS\bar{v}$ частиц, где n — концентрация



свободных носителей заряда. Если заряд каждого носителя равен q_0 , то через площадь поперечного сечения проводника в единицу времени проходит заряд, равный $q_0 n S \bar{v}$. Этот заряд и есть сила тока в проводнике:

$$I = q_0 n S \bar{v} = e n S \bar{v}, \quad (1)$$

так как для металлов q_0 равно заряду электрона e . Как известно, за направление тока принимают направление движения положительных зарядов, поэтому в металлах направление тока противоположно направлению движения электронов, поскольку их заряд отрицательный:

$$e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Как показывают расчёты, скорость упорядоченного движения электронов весьма мала.

Средняя скорость упорядоченного движения электронов в металлах весьма мала. Действительно, поскольку у большинства металлов число свободных электронов в единице объёма очень велико: $n \approx 10^{29} \text{ м}^{-3}$, то для проводника сечением 1 мм^2 при силе тока в нём 10 А согласно формуле (1) получим

$$\bar{v} = \frac{I}{|e| n S} = \frac{10}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{29} \cdot 10^{-6}} \approx \approx 7 \cdot 10^{-4} \text{ м/с} = 0,7 \text{ мм/с.}$$

ЗАВИСИМОСТЬ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Наличие сопротивления у металлов обусловлено тем, что движущиеся в проводнике электроны в результате взаимодействия с ионами кристаллической решётки теряют часть своей энергии. При этом, как показывает опыт, удельное сопротивление проводника зависит от температуры. Эта зависимость оказывается линейной:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t), \quad (2)$$

где ρ_0 — удельное сопротивление при 0°C .

В формуле (2) коэффициент α характеризует зависимость удельного сопротивления вещества от температуры и называется **температурным коэффициентом сопротивления**. Для всех металлических проводников $\alpha > 0$ и мало меняется с изменением температуры. Следовательно, сопротивление металлов с ростом температуры увеличивается в соответствии с формулой (2). Для большинства чистых металлов $\alpha \approx 0,004 \text{ К}^{-1}$.

Существуют сплавы, сопротивление которых практически не зависит от температуры. Например, у сплава меди с никелем константа $\alpha \approx 10^{-5} \text{ К}^{-1}$, причём удельное сопротивление весьма велико: $\rho \approx 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Проводники из этих сплавов применяются при изготовлении точных измерительных приборов.

ЯВЛЕНИЕ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

Зависимость сопротивления металлических проводников от температуры при очень низких температурах долгое время оставалась трудноразрешимой задачей. Однако в 1911 г. исследования голландского физика Камерлинг-Оннеса завершились крупнейшим в истории физики открытием. Им было обнаружено, что при охлаждении ртути (а также для ряда других металлов) в жидком гелии до температуры $4,12 \text{ К}$ сопротивление ртути скачком падало до нуля.

Полная потеря металлом электрического сопротивления при определённой температуре получила название **сверхпроводимости**. Если в проводнике, охлаждённом до столь низких температур, возбудить электрический ток, а затем отключить источник, то ток в сверхпроводнике может сохраняться сколь угодно долго.

В наше время сверхпроводники находят широкое применение. Например, созданы мощные электромагниты со сверхпроводящими обмотками, в которых полностью отсутствуют тепловые потери.



ВОПРОСЫ:

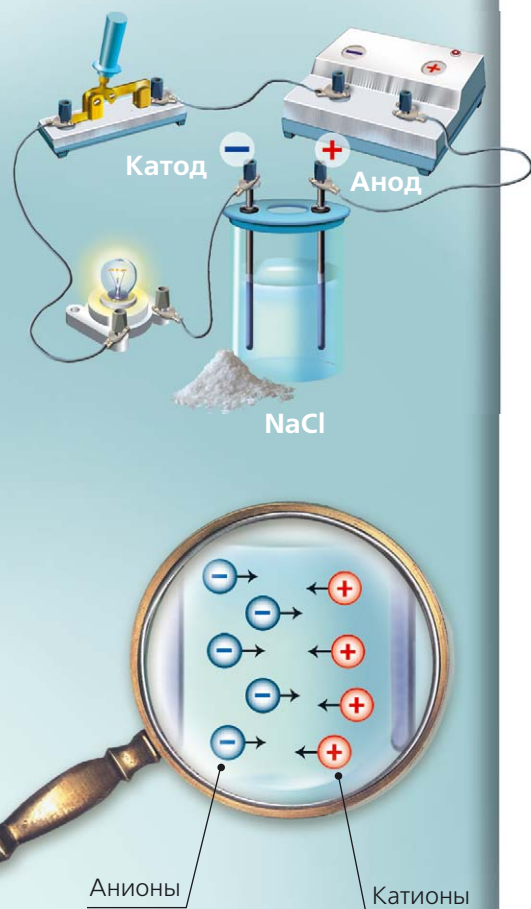
- Какова природа электрического тока в металлах?
- С какой средней скоростью осуществляется направленное движение электронов в металлах?
- Каков характер зависимости удельного сопротивления проводника от температуры?
- Выделяется ли джоулево тепло при протекании тока в сверхпроводниках?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое электролитическая диссоциация.
- Что представляет собой электрический ток в электролитах.
- Что такое электролиз.
- Как формулируется закон электролиза.
- Где применяется электролиз.

ВСПОМНИТЕ:

- Какие вещества являются проводниками электричества?
- Что такое электрический ток?
- Какова природа электрического тока в металлах?
- Что такое ионы и чем они отличаются от атомов?



ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ЭЛЕКТРОЛИТАХ

Существует широкий класс проводников, в которых электрический ток, в отличие от тока в металлах, всегда сопровождается рядом химических превращений. К таким проводникам относятся растворы солей, кислот и оснований, т.е. растворы (или расплавы) электролитов.

ПРИРОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В ЭЛЕКТРОЛИТАХ

Соберём электрическую цепь, состоящую из источника тока, ключа, лампочки, а также сосуда с дистиллированной водой, в который опущены два угольных электрода. Если замкнуть ключ, то между электродами возникнет электрическое поле, однако лампочка при этом гореть не будет. Это означает, что дистиллированная вода не проводит электрический ток. Однако если растворить в воде столовую ложку поваренной соли, то лампочка загорится. Это говорит о том, что в водном растворе соли появились свободные носители зарядов, которые под действием электрического поля пришли в направленное движение.

Известно, что при растворении в воде солей, кислот и щелочей нейтральные молекулы этих веществ под действием электрического поля молекул воды распадаются на положительные и отрицательные ионы. Это явление называют **электролитической диссоциацией**. Положительно заряженными оказываются ионы металлов и водорода, а отрицательно заряженными — кислотные остатки и гидроксильная группа OH . Положительно заряженные ионы получили название **катионов**, а отрицательно заряженные — **анионов**.

В отсутствие внешнего электрического поля ионы находятся в хаотичном тепловом движении. При этом ионы разных знаков могут снова объединяться в нейтральные молекулы. Этот процесс называют **рекомбинацией**. При неизменной температуре между процессами диссоциации и рекомбинации устанавливается динамическое равновесие: сколько молекул за единицу времени распадается на ионы, столько же пар ионов за это время вновь объединяется в нейтральные молекулы.

Характер процессов в электролите существенно изменяется, если между электродами, помещёнными в сосуд, создать электрическое поле. В этом случае начнётся упорядоченное движение ионов двумя встречными потоками: катионы начинают перемещаться к катоду, а анионы — к аноду.

Таким образом, электрический ток в растворах (или расплавах) электролитов представляет собой направленное движение ионов обоих знаков в противоположных направлениях. При этом результирующий ток, проходящий через электролит, равен сумме токов, вызываемых положительными и отрицательными ионами.

ЭЛЕКТРОЛИЗ. ЗАКОН ЭЛЕКТРОЛИЗА

Прохождение электрического тока через электролит сопровождается явлением электролиза — выделением на электродах веществ, входящих в состав электролита. Хотя химическое действие тока было открыто в 1800 г., количественная взаимосвязь между массой вещества, выделившегося на электроде, и величиной заряда, прошедшего через электролит, была установлена экспериментально М. Фарадеем только в 1833 г.

Очевидно, что масса вещества, выделившегося на электроде за некоторое время t , пропорциональна числу ионов N , достигших электрода за это время: $m = m_0 N$, где m_0 — масса иона.

Массу иона можно выразить через молярную массу M вещества и постоянную Авогадро N_A :

$$m_0 = M/N_A.$$

Число ионов, выделившихся на электроде, можно определить, зная совокупный заряд Q , прошедший через электролит за время t , и заряд одного иона q_0 :

$$N = Q/q_0.$$

Но заряд Q можно выразить через силу тока в электролите и время t : $Q = It$.

Заряд любого иона, валентность которого Z , равен произведению заряда одновалентного иона на валентность: $q_0 = eZ$ (e — модуль элементарного заряда).

Таким образом, масса выделившегося вещества

$$m = \frac{M}{N_A e Z} Q = \frac{M}{N_A e Z} It. \quad (1)$$

Согласно формуле (1) масса вещества, выделившегося на электроде, пропорциональна силе тока и времени его протекания. Это утверждение получило название **закона Фарадея для электролиза**.

Коэффициент $k = \frac{M}{N_A e Z}$ в формуле (1) называют **электрохимическим эквивалентом** данного вещества. Он численно равен массе выделившегося на электроде вещества при переносе ионами заряда, равного 1 Кл, и выражается в килограммах на кулон (кг/Кл).

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОЛИЗА

Электролиз получил самое широкое применение в технике. На этом явлении основана электрометаллургия — получение особо чистых, а также щелочных и щелочноземельных металлов (магния, бериллия и др.) путём электролиза расплавленных руд. В частности, электрохимическим методом из расплавленных оксидов алюминия Al_2O_3 получают алюминий. Аналогичным способом получают чистую медь из медных руд, содержащих примеси других металлов.

Электролитический метод широко применяют для защиты металлов от коррозии: их поверхность покрывают трудно окисляемыми металлами (хромирование, никелирование). Этот метод называют **гальваностегией**.

Закон Фарадея для электролиза сыграл важную роль в разрешении вопроса о существовании в природе наименьшей порции электричества. На основе этого закона было установлено, что для выделения моля любого одновалентного вещества всегда требуется одно и то же количество электричества. Это означает, что и на каждую частицу вещества, переносящую заряд, приходится всегда в среднем одно и то же количество электричества.

Если обозначить величины:

масса — m , молярная масса — M , постоянная Авогадро — N_A , валентность иона — Z , модуль элементарного заряда — e , сила тока — I , время — t , то массу вещества, выделившегося при электролизе на электроде за время t , вычисляют по формуле

$$m = \frac{M}{N_A e Z} It, \text{ или } m = kIt.$$

С помощью электролиза изготавливают также рельефные металлические копии предметов, которые хорошо отслаиваются от поверхности образца, покрываемого слоем металла. Этот способ покрытия металлом называется **гальванопластикой**.

ВОПРОСЫ:

- Почему дистиллированная вода, будучи изолятором, становится проводником при растворении в ней соли или щёлочи?
- Почему происходит перенос вещества при прохождении тока через раствор электролита?
- Как формулируется закон электролиза?
- Для чего применяют электролитические методы в металлургии?

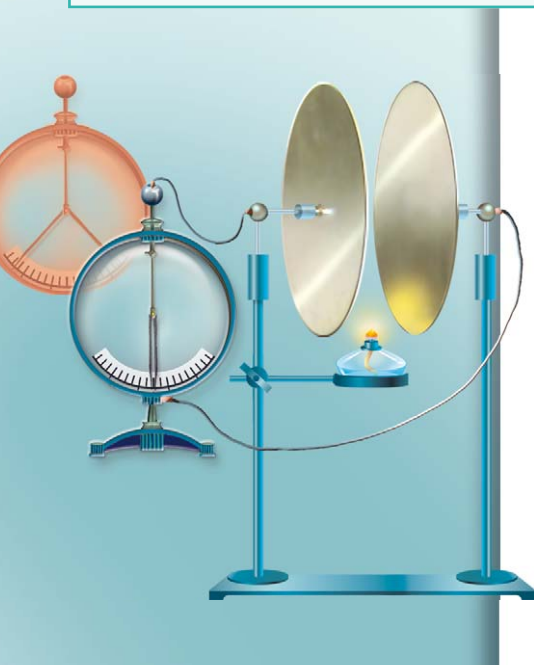
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ГАЗАХ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Какие заряженные частицы образуют ток в газах.
- Что такое термическая ионизация в газах.
- Что такое несамостоятельный и самостоятельный разряды в газах.
- Какие виды самостоятельного разряда существуют.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое ионизация атомов и молекул?
- Какие виды ионов существуют?
- Как электрическое поле действует на заряженные частицы?



В обычных условиях газы состоят из электрически нейтральных атомов и молекул и не являются проводниками электрического тока. Чтобы газ стал проводящим, в нём должны образоваться подвижные заряженные частицы. Этого можно добиться только в результате внешнего воздействия на газ.

ИОНИЗАЦИЯ ГАЗОВ. МЕХАНИЗМ ПРОВОДИМОСТИ ГАЗОВ

Для изучения электропроводности газов, в частности воздуха, можно воспользоваться установкой, состоящей из двух металлических дисков, один из которых соединён с корпусом, а другой — со стержнем электрометра. Если сообщить дискам разноимённые заряды, то, как показывает опыт, электрометр в течение длительного времени не будет разряжаться. Это означает, что электропроводность воздуха в обычных условиях весьма мала.

Иная картина будет наблюдаться, если в пространство между дисками внести пламя спиртовки. В этом случае электрометр быстро разрядится. Это означает, что нагретый воздух становится проводником. Проводимость газа можно увеличить не только его нагреванием, но и воздействием на него ультрафиолетовым или рентгеновским излучением. Во всех этих случаях происходит ионизация части атомов или молекул, из которых состоит газ. При этом образуются положительно заряженные ионы и электроны. Могут также образовываться и отрицательно заряженные ионы в результате присоединения электронов к нейтральным атомам.

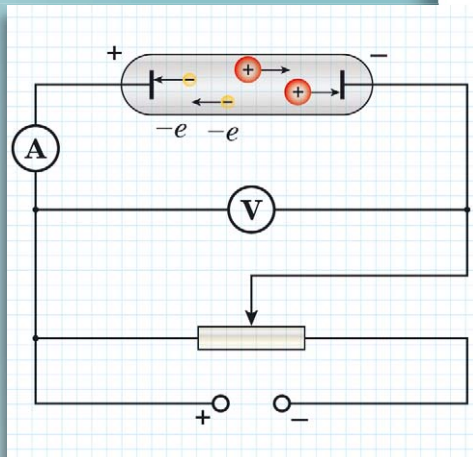
Ионизация газов при нагревании (*термическая ионизация*) объясняется тем, что по мере нагревания молекулы начинают двигаться быстрее и их кинетическая энергия увеличивается. Поэтому при столкновениях молекул или атомов электрон может оторваться от своего атома и стать свободным.

НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНЫЙ РАЗРЯД Если в результате какого-либо внешнего воздействия на газ в нём наблюдается протекание электрического тока, то такое явление называют **несамостоятельным электрическим разрядом**.

Когда действие внешнего ионизатора прекращается, то ток также быстро прекращается, поскольку новые заряды в газе уже не образуются.

Для изучения газового разряда удобно использовать стеклянную трубку, снабжённую двумя металлическими электродами, напряжение между которыми можно регулировать с помощью источника.

По мере увеличения напряжения между электродами сила разрядного тока будет возрастать. Это объясняется тем, что с увеличением напряжения увеличивается число зарядов, которые достигают электродов.



Как показывает опыт, начиная с некоторого значения напряжения сила тока перестаёт увеличиваться: все заряженные частицы, образующиеся в газе за единицу времени, достигают электродов (*ток насыщения*).

САМОСТОЯТЕЛЬНЫЙ РАЗРЯД На самом деле ток остаётся неизменным только до некоторого значения напряжения. Как показывает опыт, при дальнейшем увеличении напряжения наблюдается увеличение силы тока, что свидетельствует о появлении в газе дополнительных заряженных частиц. Увеличение силы тока может быть весьма значительным, превышающим ток насыщения в сотни раз. При этом для поддержания разряда уже не требуется внешний ионизатор. Поэтому такой разряд называют **самостоятельным разрядом**.

Однако возникает вопрос: каким образом при отсутствии внешнего ионизатора в газе появились дополнительные заряды?

Это обусловлено тем, что основным механизмом ионизации газа при самостоятельном разряде оказывается ионизация атомов и молекул ударами электронов, так как по мере роста напряжения между электродами имеющиеся в газе свободные электроны ускоряются и их кинетическая энергия возрастает. Если кинетическая энергия первичного электрона превышает энергию связи электрона в атоме или молекуле, то в результате соударения из атома выбивается ещё один вторичный электрон. Оба этих электрона вновь ускоряются в электрическом поле, и каждый из них при последующем столкновении освобождает ещё один электрон и т.д. В результате количество свободных электронов, а также положительных ионов возрастает лавинообразно.

ВИДЫ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РАЗРЯДА Виды самостоятельного разряда зависят как от свойств самого газа (рода газа, давления и т.п.), так и от приложенного напряжения.

Тлеющий разряд возникает в трубке при низком давлении газа (порядка 300–500 Па) и напряжении до нескольких сотен вольт. При тлеющем разряде свечение заполняет почти весь объём трубки. Поэтому тлеющий разряд широко используют в осветительной технике.

Искровой разряд возникает при атмосферном давлении и прекращается через короткое время в результате резкого уменьшения напряжения. В качестве примера искрового разряда может служить разряд конденсатора. Примером искрового разряда в природе является молния.

Коронный разряд возникает в сильно неоднородных электрических полях в результате ионизации атомов электронным ударом. Например, коронный разряд наблюдается вблизи проводов линий передач электрической энергии под большим напряжением. Ионизация воздуха в этих случаях осуществляется за счёт высокой напряжённости электрического поля между проводами.

Частично или полностью ионизированный газ называется **плазмой**. Плотности положительных и отрицательных зарядов плазмы практически совпадают, т.е. плазма в целом является электрически нейтральным состоянием вещества. Примерами плазмы, разогретой до очень высокой температуры, являются наше Солнце и все звёзды Вселенной. Подавляющая часть вещества во Вселенной находится именно в плазменном состоянии.

Особым видом самостоятельного разряда является *дуговой разряд*, широко используемый для сварки и резки металлов. Этот разряд можно наблюдать между двумя близко расположенными угольными электродами, находящимися под напряжением 40–50 В. Свечение дуги представляет собой яркую изогнутую полоску, которая образуется между концами электродов. При этом угольные электроды раскаляются добела и их свечение оказывается даже более ярким, чем свечение самой дуги.

ВОПРОСЫ:

- Чем ионизация газов отличается от диссоциации молекул в электролитах?
- В чём заключается основное различие между самостоятельным и несамостоятельным разрядами в газах?
- Почему в случае несамостоятельного разряда ток достигает насыщения?
- Чем тлеющий разряд отличается от всех других видов самостоятельного разряда?

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ВАКУУМЕ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое вакуум.
- Что такое термоэлектронная эмиссия.
- Что такое вакуумный диод.
- Как образуются электронные пучки.
- Как устроена электронно-лучевая трубка.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое самостоятельный газовый разряд?
- Как движутся электроны во внешнем электрическом поле?
- Что такое вольт-амперная характеристика?
- Что такое ток насыщения?



Томас Альва Эдисон

(1847—1931)

Американский изобретатель в области электротехники.

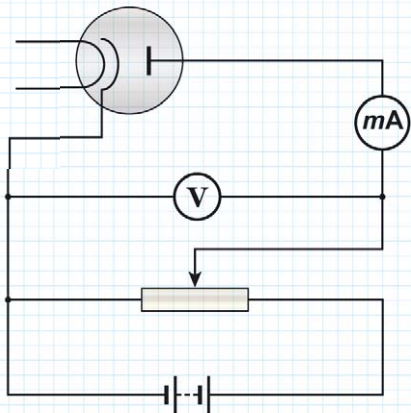
Если из трубки, в которую впаяны два электрода, откачать воздух, а затем подключить электроды к источнику напряжения, то электрический ток в цепи будет отсутствовать. Означает ли это, что в сосуде, из которого удалены молекулы газа, ток не будет возникать ни при каких условиях?

ТЕРМОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ Характер самостоятельного газового разряда в стеклянной трубке существенно зависит от давления газа. При снижении давления до 0,01 Па разряд полностью прекращается. Это обусловлено тем, что молекул газа становится настолько мало, что они успевают пролететь всю трубку, ни разу не испытав соударения друг с другом. В этих условиях ионизация молекул электронным ударом осуществиться не может. Состояние газа в сосуде, при котором молекулы практически не сталкиваются друг с другом, называют **вакуумом**. Для того чтобы в вакуумной трубке, снабжённой катодом и анодом, начал протекать электрический ток, в её внутреннем объёме должны появиться заряженные частицы.

В 1879 г. американский изобретатель Т. Эдисон обнаружил, что если в вакуумной колбе один из электродов нагреть до высокой температуры, то в колбе может возникнуть электрический ток. Для изучения природы этого тока воспользуемся установкой, состоящей из стеклянного вакуумного баллона, снабжённого двумя электродами, один из которых представляет собой металлическую спираль. Концы спирали могут подключаться к цепи накала, содержащей источник. Подключим нагретую до высокой температуры спираль (**катод**) к отрицательному полюсу батареи, а другой электрод (**анод**) к положительному. При этом миллиамперметр зарегистрирует появление в цепи электрического тока. Если же к катоду подключить положительный полюс батареи, а к аноду — отрицательный, то тока в цепи не будет.

Эти опыты свидетельствуют о том, что нагретая спираль испускает частицы, обладающие отрицательным зарядом. Было установлено, что эти частицы являются электронами. Поэтому процесс, в результате которого с поверхности нагретых тел испускаются электроны, получил название **термоэлектронной эмиссии**.

Явление термоэлектронной эмиссии объясняется тем, что при нагревании тела увеличивается кинетическая энергия свободных электронов в веществе. При некоторой температуре кинетическая энергия части электронов возрастает настолько, что связь электронов с положительными ионами разрывается, и они вылетают с поверхности тела. Эти электроны под действием электрического поля между анодом и катодом движутся в вакууме, образуя электрический ток.



ДВУХЭЛЕКТРОДНАЯ ЛАМПА — ДИОД

Вакуумный баллон, снабжённый подогреваемым электродом (*катод*) и холодным электродом (*анод*), обладает важной особенностью, а именно **односторонней проводимостью**: ток в цепи будет только тогда, когда положительный полюс источника соединён с анодом, а отрицательный — с катодом. При противоположном включении источника электрическое поле будет возвращать электроны назад на катод и тока в цепи не будет.

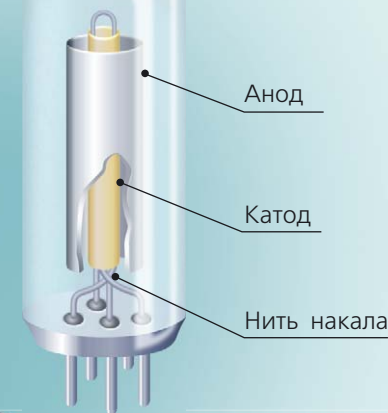
Такие двухэлектродные электронные лампы, обладающие односторонней проводимостью, называют **вакуумными диодами**. Для увеличения срока службы диода воздух из баллона откачивают до давления 10^{-4} – 10^{-5} Па. Анод чаще всего имеет форму цилиндра, по оси которого расположен катод, изготовленный из тугоплавкого металла (вольфрам, молибден). Нагрев катода, как правило, осуществляется с помощью специальной нити накала.

Как показывает опыт, зависимость силы тока в диоде от напряжения на нём, т.е. вольт-амперная характеристика диода, является нелинейной. Это объясняется тем, что вблизи раскалённого катода образуется электронное облако — область отрицательного пространственного заряда. Этот заряд препятствует движению электронов, и их часть под действием сил отталкивания вновь возвращается на катод. С увеличением напряжения плотность электронного облака уменьшается и сила тока возрастает. При определённом значении напряжения все электроны, вылетающие из катода, достигают анода и сила тока достигает максимального значения. Дальнейшее увеличение напряжения уже не может изменить силу тока (ток насыщения).

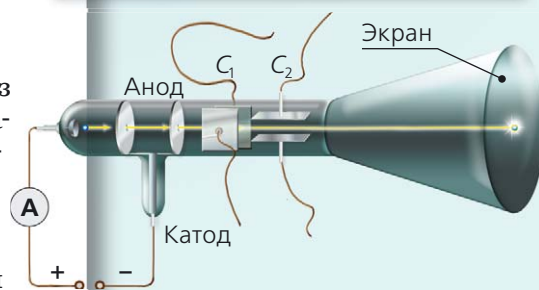
ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУЧКИ. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ТРУБКА

Из потока электронов, движущихся в пространстве между катодом и анодом, можно сформировать узкий направленный пучок. Если в аноде сделать небольшое отверстие, то часть электронов, ускоренных электрическим полем, пролетит в это отверстие, образовав электронный пучок.

Электронные пучки отклоняются в электрическом и магнитном полях. Такой способ управления электронным пучком используется в устройстве, называемом **электронно-лучевой трубкой**. Трубка представляет собой стеклянный вакуумный баллон, в котором находится электронная пушка, состоящая из накаливаемого катода и анода с отверстием. Электроны, ускоренные разностью потенциалов между катодом и анодом, в виде узкого пучка попадают на экран, покрытый флуоресцирующим составом. В месте попадания пучка возникает яркая светящаяся точка. Управление пучком электронов осуществляется двумя парами пластин C_1 и C_2 , на которые подаётся напряжение. Электрическое поле пластин C_1 смещает луч в горизонтальном направлении, а поле пластин C_2 — в вертикальном.



Электронно-лучевая трубка не только используется для формирования изображения на экране телевизора или мониторе компьютера, но и является важнейшей частью осциллографа — прибора, предназначенного для изучения быстропеременных процессов, в частности электрических колебаний.



ВОПРОСЫ:

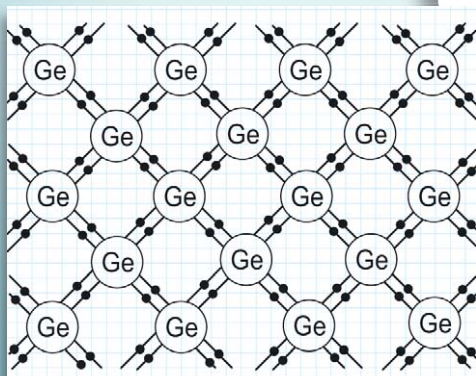
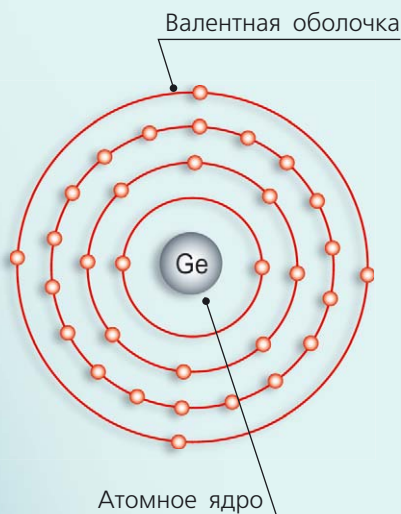
- Почему внутренний объём электронных ламп откачивают до глубокого вакуума?
- Почему катод лампы нагревают до высокой температуры?
- Как устроен вакуумный диод?
- Каковы особенности вольт-амперной характеристики вакуумного диода?
- Как осуществляется управление электронными пучками?

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое полупроводники и каково их строение.
- Какова зависимость сопротивления полупроводников от температуры.
- Что такое собственная проводимость полупроводников.
- Что такое примесная проводимость полупроводников.
- Каково применение полупроводников.

ВСПОМНИТЕ:

- Какие вещества являются проводниками, а какие — диэлектриками?
- Какие электроны называют свободными?
- Какова зависимость сопротивления металлических проводников от температуры?



ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

При изучении электрических явлений, в частности условий существования электрического тока, было установлено, что все вещества по проводимости электрического тока делятся на два класса: проводники и диэлектрики (изоляторы). Однако существует ещё один класс веществ, которые нельзя отнести ни к диэлектрикам, ни к хорошим проводникам. Такие вещества называют полупроводниками. К ним относится не только ряд химических элементов (кремний, германий, бор, селен), но и многочисленные минералы, оксиды, сульфиды.

СТРОЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ Рассмотрим строение типичных представителей полупроводников — германия и кремния. На внешней незаполненной оболочке каждого из атомов этих элементов находится четыре электрона, которые сравнительно слабо связаны с ядром. Эти электроны называют **валентными**, так как они определяют валентность химического элемента, т.е. способность его атомов вступать в химические связи с определённым числом других атомов.

Германий и кремний, а также многие другие полупроводники являются кристаллическими веществами, для которых характерно упорядоченное расположение атомов. Атомы образуют кристаллическую решётку, состоящую из отдельных элементарных ячеек. Для кристаллической решётки германия, как и кремния, характерна кубическая форма элементарной ячейки, содержащей восемь атомов. При этом каждый атом находится на одинаковом расстоянии от четырёх соседних атомов решётки. Взаимодействие двух соседних атомов, находящихся в узлах решётки, осуществляется с помощью парноэлектронной связи, которую называют **ковалентной связью**. Эта связь образуется в результате отрыва от каждого из двух атомов по одному валентному электрону, которые и объединяются в пару. Каждый атом германия (или кремния) образует четыре парноэлектронные связи с соседними четырьмя атомами. При этом коллективизированная пара электронов уже не принадлежит конкретным атомам, а является «собственностью» всего кристалла. На плоской схеме кристаллической решётки германия парноэлектронную связь можно изобразить в виде двух точек или маленьких кружочков на прямых отрезках, соединяющих соседние атомы.

ЗАВИСИМОСТЬ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Наиболее характерным отличием полупроводников от проводников является зависимость их удельного сопротивления от температуры. При очень низких температурах, близких к абсолютному нулю, удельное сопротивление большинства полупровод-

ников становится настолько большим, что они практически превращаются в диэлектрики. При комнатной температуре электрическое сопротивление полупроводников оказывается меньше, но всё же достаточно большим по сравнению с сопротивлением металлов. По мере дальнейшего роста температуры удельное сопротивление таких полупроводников, как германий, кремний, селен и др., уменьшается весьма значительно.

Такая зависимость электропроводности полупроводников от температуры объясняется особенностями их строения. Как известно, высокая электропроводность металлов объясняется тем, что валентные электроны в них легко отделяются от своих атомов и становятся свободными электронами. Их концентрация в металлах очень велика при любой температуре.

В полупроводниках связь валентных электронов с атомами значительно сильнее. Поэтому при низких температурах концентрация свободных электронов в полупроводниках меньше их концентрации в металлах в миллиарды раз. А потому электропроводность полупроводников оказывается крайне низкой.

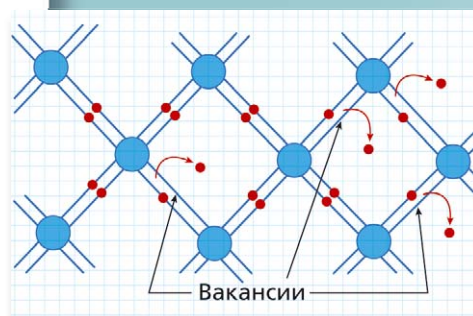
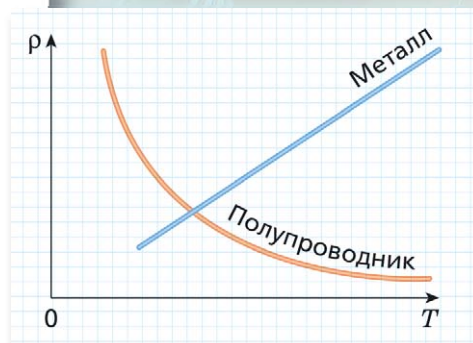
При повышении температуры кристаллического полупроводника некоторые из валентных электронов приобретают энергию, достаточную для разрыва ковалентных связей. В результате кристалл обогащается свободными электронами, и его проводимость возрастает.

СОБСТВЕННАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ Число разорванных ковалентных связей полупроводника зависит от степени его нагретости. Например, при нагревании кристалла германия от комнатной температуры до температуры порядка $300\text{--}400^\circ\text{C}$ число свободных электронов увеличивается от 10^{17} до 10^{24} 1/м^3 .

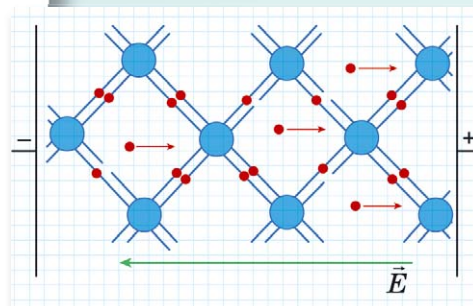
Если при этом к кристаллу приложить внешнее напряжение, то свободные электроны под действием электрического поля начнут направленно перемещаться между узлами кристаллической решётки, образуя электрический ток. Проводимость полупроводников, создаваемая движением свободных электронов, называется **электронной проводимостью**.

При разрыве ковалентной связи в том месте, где был электрон, образуется вакантное место с недостающим электроном. Это вакантное место называют **дыркой**. Получившаяся картина выглядит так, как если бы среди электронных пар с нормальными связями появилась разрушенная связь с избыточным положительным зарядом. Другими словами, дырка ведёт себя как положительно заряженная частица.

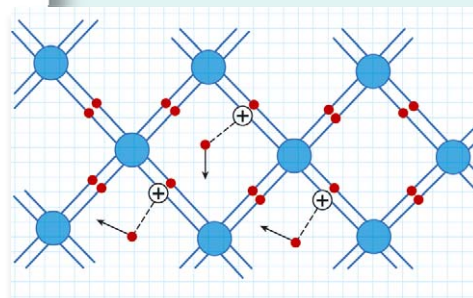
Положение образовавшейся вакансии в кристалле не является неизменным. Это вакантное место может занять какой-либо из электронов, обеспечивавших ковалентную связь в соседнем атоме. Следовательно, в том месте, где раньше была дырка, парноэлектронная связь



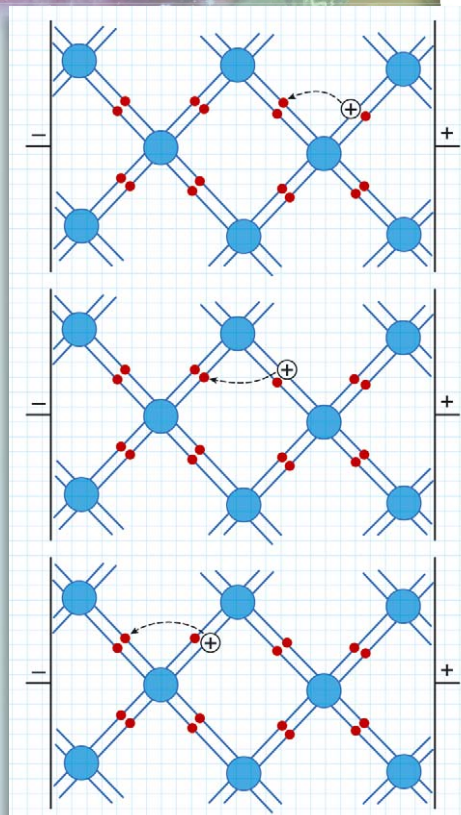
Внешнее поле отсутствует



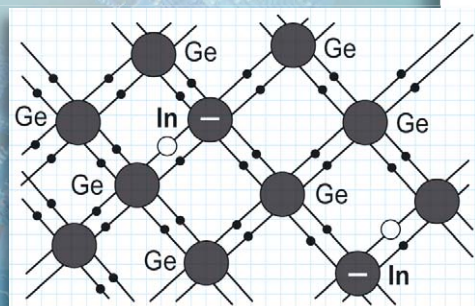
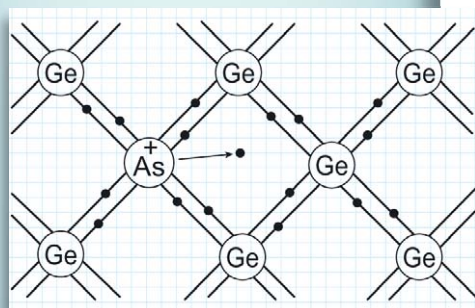
Внешнее поле присутствует



Внешнее поле отсутствует



Последовательное перемещение дырки во внешнем поле



восстанавливается, а там, откуда перескочил электрон, образуется новая вакансия. Такой процесс может повторяться многократно, в результате чего дырка будет перемещаться по всему кристаллу.

Если в полупроводнике создать электрическое поле, то дырки будут двигаться преимущественно в том направлении, в каком двигались бы в электрическом поле положительные заряды. Такой тип проводимости называют **дырочной проводимостью**.

Говоря о перемещении дырок, имеют в виду последовательное перемещение от одного атома к другому электронов из числа разорванных ковалентных связей, а не свободных электронов.

Таким образом, в кристаллических полупроводниках без примесей присутствуют носители зарядов обоих типов: электроны и дырки. Этот тип проводимости называют **собственной проводимостью** полупроводника.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

ПРИ НАЛИЧИИ ПРИМЕСЕЙ

Собственная проводимость полупроводников при обычных условиях невелика, так как число свободных электронов в них очень мало. Вместе с тем проводимость полупроводников существенно зависит от наличия в них примесей. Поэтому проводимость, обусловленную имеющимися примесями, называют **примесной проводимостью**.

Рассмотрим пример, когда в кристалле германия имеется примесь пятивалентных атомов мышьяка, которые замещают в узлах кристаллической решётки атомы германия. Атом мышьяка может образовывать ковалентные связи только с четырьмя атомами германия, поскольку число связей определяется строением кристаллической решётки полупроводника. Пятый валентный электрон мышьяка теряет связь со своим атомом и становится свободным. При этом атом мышьяка, потеряв один электрон, превращается в неподвижный положительный ион. Таким образом, в результате введения небольшой примеси мышьяка кристалл германия обогащается свободными электронами. Поэтому примеси, легко отдающие электроны, называют **донорными** (отдающими) **примесями**.

В полупроводниках, обогащённых донорными примесями, электроны являются основными носителями тока, а дырки, также имеющиеся в небольшом количестве, — неосновными. Такие полупроводники называют **электронными полупроводниками** или **полупроводниками *n*-типа** (от лат. *negatives* — отрицательный).

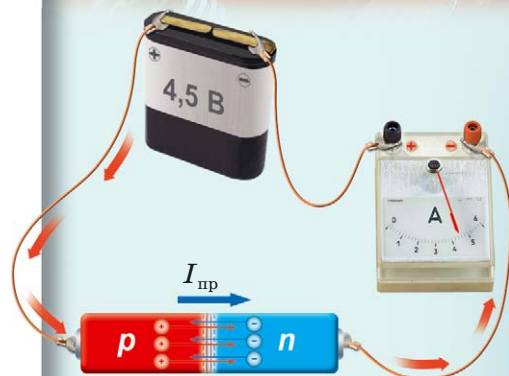
Если в кристалле германия в качестве примеси использовать индий или бор, атомы которых трёхвалентны, то характер проводимости полупроводника станет иным. Действительно, атом индия может образовывать ковалентные связи только с тремя соседними атомами германия, а связь с четвёртым атомом окажется незавершённой. При этом атом примеси захватывает валентный

электрон у одного из соседних атомов германия и превращается в неподвижный отрицательный ион. Захват электрона приводит к образованию дырки, которая может быть занята электроном из соседней связи. Поэтому дырка может свободно перемещаться по кристаллу.

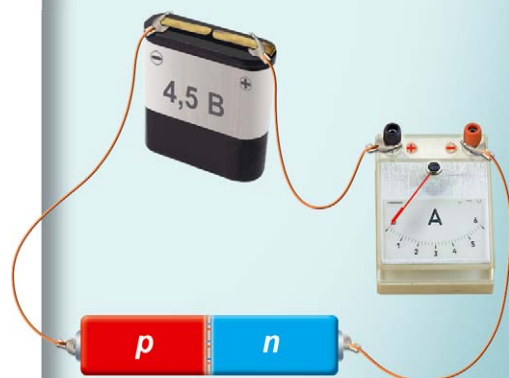
Примеси, при введении которых происходит обогащение кристалла подвижными дырками, называют **акцепторными** (от лат. *acceptor* — приёмщик). В этом случае дырки являются основными носителями тока, а электроны проводимости — неосновными. Соответственно такие полупроводники называют **дырочными полупроводниками** или **полупроводниками p -типа** (от лат. *positives* — положительный).

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ Работа устройств, содержащих полупроводники, основана на одном важном свойстве контакта двух полупроводников с различным типом проводимости. Границу контакта двух полупроводников, один из которых имеет электронную проводимость, а другой — дырочную проводимость, называют **p - n -переходом**. В месте контакта полупроводников начинается процесс диффузии электронов из n -области, где их много, в p -область, где их концентрация мала, и перемещение дырок в обратном направлении. В результате в электронном полупроводнике появляется нескомпенсированный положительный заряд, а в дырочном — нескомпенсированный отрицательный заряд. Возникшее при этом электрическое поле между двумя слоями объёмного заряда будет препятствовать дальнейшему процессу диффузии электронов и дырок. Главной особенностью p - n -перехода является его односторонняя проводимость: ток через контакт наблюдается только тогда, когда на полупроводник p -типа подан положительный потенциал, а n -типа — отрицательный. При этом проводимость всего образца оказывается большой (прямое включение p - n -перехода). При изменении полярности подключения p - n -перехода ток через него оказывается пренебрежимо малым (обратное включение p - n -перехода). На этом свойстве p - n -перехода основана работа полупроводниковых диодов, являющихся главной частью различных электронных устройств. Важнейшим свойством p - n -перехода является возможность его использования для усиления и генерации электрических колебаний. Для этих целей служат полупроводниковые устройства, которые называют **транзисторами**. Транзистор содержит уже два p - n -перехода, что позволяет управлять напряжением на выходе электрической цепи.

Транзисторы находят широкое применение в различных областях науки и техники. Например, вся современная микроэлектроника основана на элементной базе, состоящей из транзисторов. Без транзисторов невозможно создание новейших компьютеров, средств связи, а также многих медицинских и бытовых приборов.



Прямое включение p - n -перехода



Обратное включение p - n -перехода

ВОПРОСЫ:

- Как изменяется сопротивление полупроводника при понижении температуры? при повышении температуры?
- Что такое дырки? Как движутся дырки во внешнем электрическом поле?
- Какой тип проводимости будет у кристалла кремния, если в качестве примеси использовать бор?
- Что такое p - n -переход и какова его главная особенность?

ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

- Электрический ток в металлах представляет собой упорядоченное движение свободных электронов.
- Электрический ток в растворах (или расплавах) электролитов представляет собой направленное перемещение ионов обоих знаков в противоположных направлениях.
- Прохождение электрического тока через электролит сопровождается явлением электролиза. Согласно закону электролиза масса вещества, выделившегося на электроде, пропорциональна силе тока и времени его протекания.
- Протекание электрического тока через газ носит характер разряда. Существуют несамостоятельный и самостоятельный газы разряды.
- Процесс, в результате которого с поверхности нагретых тел испускаются электроны, называют термоэлектронной эмиссией. Электроны под действием электрического поля между анодом и катодом движутся в вакууме, образуя электрический ток.
- Полупроводники — это ещё один класс веществ, которые нельзя отнести ни к диэлектрикам, ни к хорошим проводникам.
- В кристаллических полупроводниках без примесей присутствуют носители зарядов обоих типов: электроны и дырки.
- Проводимость полупроводников существенно зависит от наличия в них примесей. Существуют электронные (*n*-типа) и дырочные (*p*-типа) полупроводники.
- Границу контакта двух полупроводников, один из которых имеет электронную проводимость, а другой — дырочную проводимость, называют *p-n*-переходом.

ПОДРОБНЕЕ...

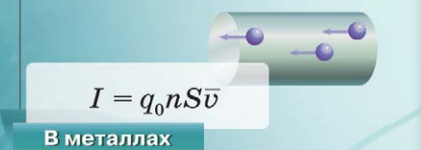
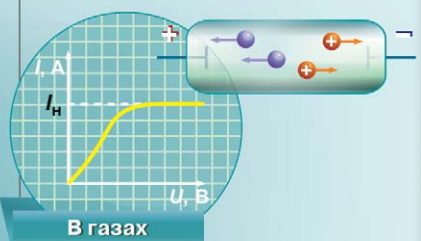
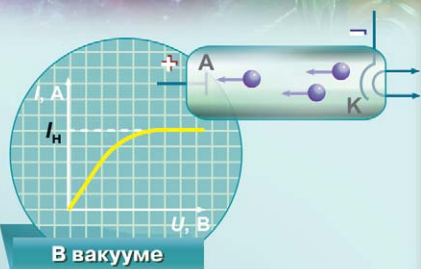
Большая книга знаний для школьников от А до Я. Человек. Природа. Наука. Техника (Oxford Illustrated Science Encyclopedia). — М.: Эксмо, 2011.

Лиюцци М. История физики. / М. Лиюцци. — М.: Мир, 1970.

Типлер П.А., Ллуэллин Р.А. Современная физика. Т.2. / П.А. Типлер, Р.А. Ллуэллин. — М.: Мир, 2007.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

- Два металлических проводника, площади поперечного сечения которых различаются вдвое, соединены последовательно. В каком из них средняя скорость упорядоченного движения электронов больше?
- Проводимость разреженных газов выше, чем проводимость плотных газов. Означает ли это, что чем более разрежен газ, тем выше его проводимость?
- Измерение зависимости сопротивления полупроводников от температуры проводят при очень слабом освещении. Как вы думаете, с чем это связано?



ТОК
В СРЕДАХ

Научно-популярный физико-математический журнал «Квант»

<http://gotourl.ru/13725>

Журнал «Наука и техника»

<http://gotourl.ru/13736>

- ВОПРЕКИ ТРЕТЬЕМУ ЗАКОНУ НЬЮТОНА?
- ДЕЙСТВИТЕЛЬНО ЛИ ВОЗМОЖЕН ВЫИГРЫШ В ЭНЕРГИИ
- ЗАДАЧА ДЕМОКРИТА
- КОНВЕКЦИЯ, ДИФфуЗИЯ И ВРЕМЕНА ГОДА
- НАСКОЛЬКО ПЛОТНО «УПАКОВАНЫ» МОЛЕКУЛЫ ВОДЫ
- СПОСОБ ПРИГОТОВЛЕНИЯ СЛИВОК
- ИСПАРЕНИЕ И КОНДЕНСАЦИЯ
- НАСКОЛЬКО БЫСТРО ИСПАРЯЕТСЯ ВОДА
- СОЛЁНЫЙ ЛЁД И СОЛЁНАЯ ВОДА
- ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ВОДЯНОЙ СТРУИ
- НЕИССЯКАЕМЫЙ ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ





Механика

Для более глубокого усвоения и закрепления учебного материала по механике особенно полезны так называемые творческие задачи и упражнения, для решения которых недостаточно знать только формулы. Творческие задания тем и отличаются от стандартных тренировочных, что зачастую не имеют строго очерченных рамок решений. Некоторые из этих заданий можно использовать для самостоятельных физических исследований.

ВОПРОК ТРЕТЬЕМУ ЗАКОНУ НЬЮТОНА?



Хорошо известна задача-софизм о том, почему всё-таки лошадь тянет телегу, а не наоборот. Поскольку силы воздействия лошади на телегу и телеги на лошадь действительно равны и противоположно направлены, то для разрешения софизма следует учесть взаимодействие лошади и телеги с землёй.

Не менее широко известен хрестоматийный пример барона Мюнхгаузена, который вытащил себя вместе с лошадью из болота за волосы. Совершенно очевидно, что это невозможно: внутренние силы не могут изменить положение центра масс системы тел. С какой силой рука барона тянула волосы, с такой же силой волосы воздействовали на руку в противоположном направлении.



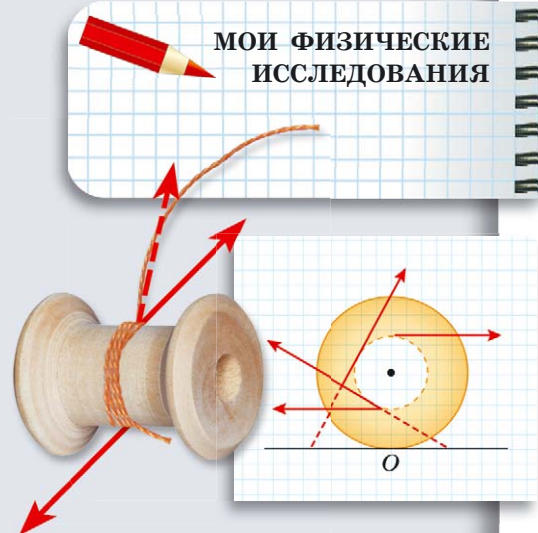
Хорошо известно, что движущийся поперёк дороги велосипедист может въехать на тротуар, который находится выше уровня дороги. Для этого велосипедисту необходимо поднять переднее колесо, подтягивая руль к себе, при этом пригибая плечи и голову к рулю. Как вы думаете, какую роль в этом примере играет движение велосипедиста по инерции?

МОИ ФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучите поведение катушки с намотанной на неё нитью при условии, что катушка может катиться без проскальзывания по горизонтальной поверхности. Убедитесь на опыте, что в зависимости от значения угла между направлением нити и горизонталью направление движения катушки может изменяться на противоположное. Определите этот угол.

«ПОМОЩНИК»

- Для предотвращения бокового смещения катушки её следует прокатывать между двумя параллельными линейками, положенными на стол.
- Если вам потребуются значения внешнего R и внутреннего r радиусов катушки, то их можно измерить с помощью линейки.
- Ответить на поставленный вопрос вам поможет рисунок.



ДЕЙСТВИТЕЛЬНО ЛИ ВОЗМОЖЕН ВЫИГРЫШ В ЭНЕРГИИ

Представим себе, что бетонную сваю массой 100 кг, лежащую на дне заполненного водой бассейна, необходимо поднять на высоту 1 м.

Так как на тело в воде действует выталкивающая сила, то для его поднимания, очевидно, нужно прилагать силу, меньшую 980 Н. При этом внешняя сила совершит работу, меньшую чем 980 Дж.

После удаления воды из бассейна имеется поднятое на высоту 1 м тело, которое обладает запасом потенциальной энергии 980 Дж. Получается, что вопреки закону сохранения энергии затраченная на подъём сваи энергия меньше, чем приобретённая. Этот парадокс означает, что в наших рассуждениях не были учтены все энергетические изменения системы вода—свая.

Действительно, тот кажущийся выигрыш в энергии на самом деле возник в результате того, что в данном случае не учитывается уменьшение потенциальной энергии воды, в которую погружена свая. Когда свая поднимается вверх, то на её место опускается некоторый объём воды, что и приводит в итоге к уменьшению потенциальной энергии жидкости.

Таким образом, баланс энергии сохраняется: совершённая над системой вода—свая работа в точности равна изменению потенциальной энергии системы.



А теперь попробуйте самостоятельно ответить на вопрос: за счёт какой энергии поднимаются вверх воздушные шары и стратостаты?

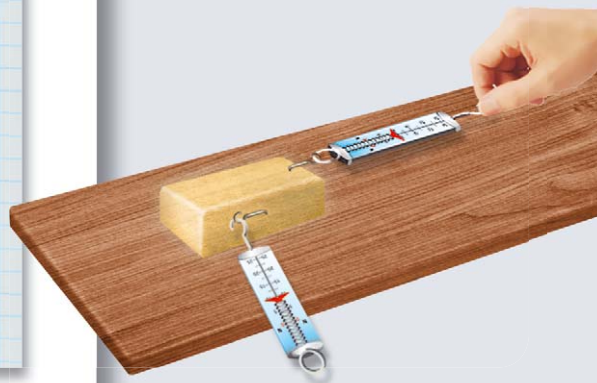
Опытные водители хорошо знают, что, когда автомобиль движется «юзом», т.е. с проскальзыванием колёс, даже незначительные боковые толчки могут сбросить машину с дороги. Почему это происходит?

Чтобы разобраться в этом явлении, изучите, как будет изменяться характер движения бруска в том случае, когда на него начнёт действовать сила, направленная перпендикулярно первоначальному направлению движения бруска.

«ПОМОЩНИК»

- С помощью булавок прикрепите к бруску два динамометра: один — к торцу, другой — к боковой поверхности.
- Посредством динамометра, прикреплённого к торцу, медленно перемещайте брусок по поверхности стола.
- Определите минимальную силу, с которой нужно подействовать на брусок сбоку, чтобы он сместился в направлении, перпендикулярном направлению движения.
- Объясните полученный результат.

МОИ ФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ





Молекулярная физика

Полученных вами знаний по молекулярной физике вполне достаточно для рассмотрения ряда конкретных физических явлений и задач, решение которых имеет оценочный или качественный характер. Кроме того, некоторые из предложенных заданий могут послужить основой для самостоятельной работы в рамках рубрики «Мои физические исследования».

ЗАДАЧА ДЕМОКРИТА

Попытаемся ответить на вопрос, поставленный Демокритом более чем 2500 лет назад: «Сколько раз следует повторить процедуру разрезания пополам сначала целого яблока, затем его половины, затем его четверти и т.д., чтобы в итоге получить уже неразделимую далее частицу вещества, т.е. атом?» Понимая всю условность поставленной задачи, для оценки числа разрезов яблока зададим значение его диаметра $d_{\text{яб}} \approx 10$ см, а также размер атома $d_{\text{ат}} \approx 10^{-8}$ см.

После первого разрезания яблока пополам получим уменьшение его размера в 2 раза, т.е. в качестве оценки будем считать $d_{\text{яб}}/2$. После разрезания пополам половины яблока получим $d_{\text{яб}}/4 = d_{\text{яб}}/2^2$. Повторив N раз процесс последовательного разрезания пополам кусочков яблока, в итоге придём к выводу, что размер последнего, N -го кусочка равен $d_{\text{яб}}/2^N$. Поскольку должно выполняться равенство

$$\frac{d_{\text{яб}}}{2^N} = d_{\text{ат}},$$

то отсюда получим $2^N = \frac{d_{\text{яб}}}{d_{\text{ат}}} = 10^9 \approx (2^{3,33})^9$.

Следовательно, минимальное число разрезов яблока $N \approx 3,33 \cdot 9 \approx 30$.



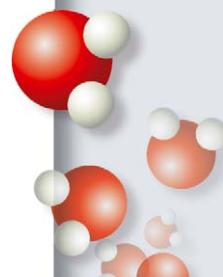
Как вы думаете, можно ли путём механического разделения реально получить мельчайшую частицу вещества, т.е. молекулу или атом? Каковы при этом должны быть размеры соответствующих инструментов?

КОНВЕКЦИЯ, ДИФфуЗИЯ И ВРЕМЕНА ГОДА

На подоконник был поставлен аквариум с мутной водой. Спустя сутки муть осела и осталась только у стенки аквариума, обращённой к комнате. В какое время года наблюдалось это явление? Прежде всего отметим, что в данном опыте процесс диффузии не мог играть сколь-нибудь значимую роль, поскольку концентрация взвешенных частиц мути была одинакова по всему объёму аквариума. Следовательно, единственным процессом, объясняющим данное явление, является конвекция.



Однако остаётся вопрос о направлении конвекционных потоков. Почему частицы мути скапливались у передней стенки аквариума? Не может ли оказывать влияние на этот процесс разность температур между стенками аквариума? После такой подсказки остаётся сделать лишь один шаг, чтобы получить ответ на вопрос задачи. Попробуйте провести данный опыт в разное время года, например зимой и летом.



НАСКОЛЬКО ПЛОТНО «УПАКОВАНЫ» МОЛЕКУЛЫ ВОДЫ

Объём молекулы воды можно оценить значением $V_0 \approx 1,1 \cdot 10^{-23} \text{ см}^3$. Какой процент от всего объёма, занятого водой, приходится на долю самих молекул?

Для упрощения вычислений рассмотрим один моль воды, объём которого $V_M = 18 \text{ см}^3$. Суммарный объём всех молекул, содержащихся в одном моле воды, равен $V_{\text{молек}} = N_A V_0$. Следовательно, искомое отношение

$$\frac{V_{\text{молек}}}{V_M} = \frac{N_A V_0}{V_M} = \frac{6 \cdot 10^{23} \cdot 1,1 \cdot 10^{-23}}{18} = 0,33 = 33 \%$$

Полученный результат лишний раз подтверждает, что между молекулами существуют промежутки.



Как вы думаете, можно ли аналогичные вычисления провести для твёрдых тел, например кристаллов?

СПОСОБ ПРИГОТОВЛЕНИЯ СЛИВОК

Известно, что молоко представляет собой суспензию, т.е. взвесь, в которой нерастворимые мельчайшие капельки жира находятся во взвешенном состоянии. Наверное, вы догадались, что главной причиной того, почему мельчайшие взвешенные частицы долго не выпадают в осадок или поднимаются вверх, является тепловое движение молекул. При этом скорость теплового (броуновского) движения взвешенных частиц существенно зависит от температуры среды. Особенно легко в этом можно убедиться с помощью простых и наглядных опытов.



Приготовьте две одинаковые банки и наполните одну из них холодной, а другую горячей водой. С помощью двух пипеток одновременно капните в центры банок по несколько капель какого-либо красящего вещества. Попробуйте опытным путём оценить скорость диффузии частичек краски в холодной и горячей воде и сделайте соответствующие выводы. Возможно, результаты этих наблюдений помогут вам получить ответ на поставленный вопрос: какой способ можно предложить, чтобы сливки в молоке отстоялись как можно быстрее?





Основы термодинамики

В основе многих природных явлений лежат взаимные превращения газов, жидкостей и твёрдых тел. Анализируя даже хорошо известные агрегатные превращения, всегда можно обнаружить такие явления, которые представляются неочевидными и парадоксальными.

ИСПАРЕНИЕ И КОНДЕНСАЦИЯ

МОИ ФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оцените опытным путём число молекул, испаряющихся каждую секунду с поверхности воды, налитой в стакан.

«ПОМОЩНИК»

- Оцените время, по прошествии которого уровень воды в стакане опустится, например, на 5 мм.
- Измерив диаметр стакана, найдите объём испарившейся воды.
- Считая известным, что в 1 см^3 воды содержится примерно $3,3 \cdot 10^{22}$ молекул, оцените число испарившихся молекул за время наблюдения.

Такое обычное явление, как испарение жидкости, например воды, может на первый взгляд показаться загадочным. Почему постепенно испаряется налитая в стакан вода, имеющая температуру окружающего воздуха? Ведь для её испарения необходимо определённое количество теплоты, которое вода может получить только от окружающей среды. Но процесс теплопередачи возможен лишь в том случае, если между телами существует разность температур.

Вы, конечно, знаете ответ на поставленный вопрос. Дело в том, что испарение происходит за счёт вылета из жидкости наиболее быстрых молекул, способных преодолеть силы межмолекулярного притяжения. Средняя скорость теплового движения остальных молекул уменьшается, что неизбежно ведёт к понижению температуры жидкости. В результате теплообмен между жидкостью и окружающей средой становится возможным. При испарении масса воды в сосуде уменьшается, а масса водяных паров, содержащихся в воздухе, увеличивается.



Представим, что на открытом воздухе летним вечером оставлен стакан с водой. При каких внешних условиях масса воды в сосуде не только перестаёт уменьшаться, но и начинает увеличиваться? Для ответа на поставленный вопрос подумайте, как связаны указанные процессы с влажностью окружающего воздуха.

НАСКОЛЬКО БЫСТРО ИСПАРЯЕТСЯ ВОДА

Если поставить стакан с водой на подоконник и наблюдать за процессом её испарения, то заметное понижение уровня воды можно обнаружить лишь спустя несколько дней. Не противоречит ли этот результат молекулярно-кинетической теории? Оценим, какая масса воды испаряется с поверхности воды в сосуде за единицу времени. Если обозначить через n концентрацию молекул пара вблизи поверхности воды при температуре T , то через поверхность жидкости площадью S за время t вылетает число молекул

$$N \approx nSvt,$$

где $v = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$ — тепловая скорость молекул;
 M — молярная масса воды.



Концентрацию молекул можно выразить через давление p пара:

$$n = \frac{p}{kT},$$

где k — постоянная Больцмана.

Если относительная влажность в помещении φ , то $p = \varphi p_n$, где p_n — давление насыщенного пара при данной температуре. Следовательно, масса испарившейся воды

$$m = N \frac{M}{N_A} \sim \frac{\varphi p_n S M}{N_A k T} \sqrt{\frac{3RT}{M}} t = \varphi p_n S \sqrt{\frac{3M}{RT}} t.$$

Если для оценки принять $\varphi = 60\%$, $T = 393\text{ К}$, $S \approx 10^{-3}\text{ м}^2$, то, подставив числовые значения $p_n = 2,3 \cdot 10^3\text{ Па}$, $M = 18 \cdot 10^{-3}\text{ кг/моль}$, получим, что каждую секунду должна испаряться масса воды $m \sim 6 \cdot 10^{-3}\text{ кг} = 6\text{ г}$. Это означает, что вода массой 200 г должна испариться из стакана примерно за полминуты, т.е. буквально на глазах!

На самом же деле вода может находиться в стакане больше недели. По-видимому, при оценке мы не учли какую-то важную особенность процесса испарения.

Действительно, мы совсем не приняли во внимание то, что значительная часть испарившихся молекул будет неизбежно возвращаться в жидкость. Пар, находящийся непосредственно над поверхностью воды, близок к состоянию насыщения. Это и приводит к резкому замедлению процесса испарения.



Подумайте, как можно ускорить процесс испарения воды.



СОЛЁНЫЙ ЛЁД И СОЛЁНАЯ ВОДА

Как известно, для предотвращения гололёда дороги и тротуары часто посыпают солью. Когда наступает оттепель и температура окружающего воздуха становится положительной, то на дорогах начинает таять лёд, т.е. образуется вода. Поэтому при последующем понижении температуры до 0°С на дороге появится ледяная корка, что отрицательно повлияет на безопасность движения. Добавление же соли способствует понижению температуры замерзания воды. Это связано с тем, что для разрушения кристаллической решётки соли требуется приток энергии извне. Это и приводит к понижению температуры соляного раствора.

То, что добавление соли способствует понижению температуры, было хорошо известно нашим предкам. Поэтому раньше в погребах специально заготавливали лёд, смешанный с солью и покрытый сверху соломой или опилками.



Как влияет добавление соли на температуру кипения воды?



МОИ ФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучите изменение температуры раствора в процессе растворения поваренной соли в воде.

«ПОМОЩНИК»

- В качестве термометра удобно использовать мультиметр, снабжённый шкалой для измерения температуры.
- Налейте в стакан примерно 30 мл воды и насыпьте в него $8\text{--}10\text{ г}$ поваренной соли.
- Поместив в воду термометр, осторожно помешивайте раствор стеклянной палочкой с целью ускорения процесса растворения соли.



Основы электродинамики

Мир электрических явлений чрезвычайно многообразен. С этими явлениями мы постоянно сталкиваемся не только в учебной лаборатории, но и в быту, а также в окружающей нас природе. Внимательный анализ многих из них может нацелить вдумчивого наблюдателя на глубокие и плодотворные размышления и даже послужить основой небольшого самостоятельного исследования.

ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ВОДЯНОЙ СТРУИ

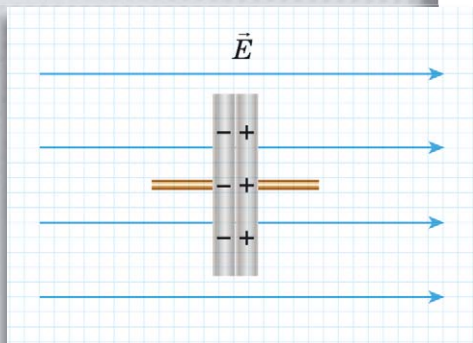
Как показывают опыты, тонкая струйка воды обычно дробится внизу на мелкие капли. Разбиение струи на капли связано с возмущением, возникающим на поверхности струи при её истечении из отверстия в сосуде. Большую роль при этом играет поверхностное натяжение воды, которое способствует формированию капель. Если к тому месту струи, где начинается процесс её дробления на капли, приблизить сильно наэлектризованную эбонитовую палочку, то струйка вновь станет сплошной. Почему это происходит?

Слияние капель в целостную струю происходит благодаря взаимодействию индуцированных на поверхности капелек электрических зарядов. В результате разделения зарядов, происходящего в каждой капле под влиянием электрического поля палочки, их обращённые друг к другу стороны оказываются заряженными разноимённо, и капли будут взаимно притягиваться. При этом форма струи может искривиться вследствие её притяжения к палочке.



Возможно ли аналогичное воздействие электрического поля на сыпучие вещества, например при просеивании сахарной пудры через ситечко? Попробуйте это проверить на опыте.

НЕИССЯКАЕМЫЙ ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ



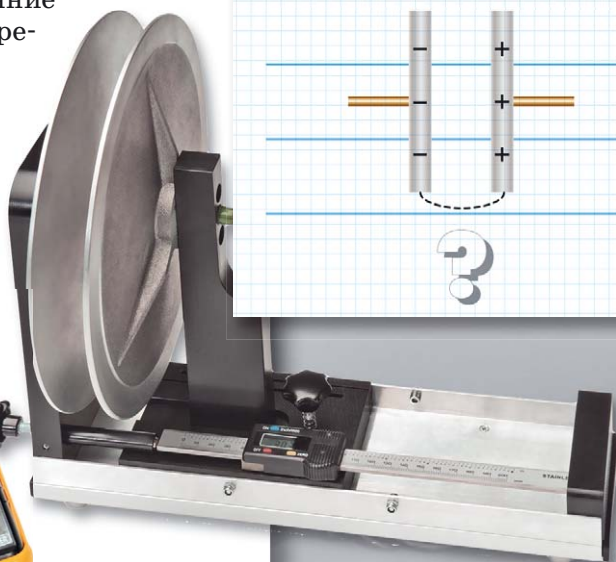
Если в однородное электрическое поле внести два плотно соприкасающихся проводящих диска, снабжённых изолирующими ручками, то эти диски зарядятся равными по модулю и противоположными по знаку зарядами. Если теперь, не выключая поля, диски слегка развести, то получим два разноимённо заряженных тела. Такую процедуру можно повторять многократно, получая всё новые заряженные тела, обладающие электрической энергией. Складывается впечатление, что вопреки закону сохранения энергии можно фактически из ничего получать электрическую энергию.

На самом деле, конечно, никакого противоречия с законом сохранения энергии нет. Дело в том, что процесс

разделения зарядов в проводнике вследствие явления электростатической индукции осуществляется очень быстро. Поэтому как на этапе помещения дисков в электрическое поле, так и на этапе их разделения и последующего извлечения из поля сторонние силы обязательно должны совершить определённую работу.



Как вы думаете, а нельзя ли фактически из ничего получить электрический ток, соединив проводником разноимённо заряженные диски, не извлекая их из электрического поля?



Какой нагреватель предпочтительнее?

Представим себе, что в вашем распоряжении имеются две нихромовые спирали сопротивлением 4–5 Ом каждая. Из спиралей можно изготовить электрический нагреватель двумя способами: соединив спирали либо последовательно, либо параллельно. Каким из нагревателей следует воспользоваться для того, чтобы как можно быстрее нагреть воду в сосуде до определённой температуры? В качестве источника питания используйте обычную батарейку напряжением 4,5 В.

«ПОМОЩНИК»

- Из нихромовой проволоки диаметром 0,5–1,0 мм изготовьте две одинаковые спирали, намотав на карандаш 10–12 витков проволоки.
- Налейте в стакан или в сосуд калориметра примерно 50 мл воды.
- Поместите в сосуд нагреватель таким образом, чтобы он полностью был погружён в воду.
- Изменение температуры воды контролируйте с помощью термометра.
- С помощью соединительных проводов подключите нагреватель к батарейке.
- Для измерения времени нагревания воды до определённой температуры используйте часы.
- Измерения проводите для каждого способа соединения спиралей.
- Сделайте выводы о том, какой из нагревателей обладает большей мощностью.



МОИ ФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ



ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Проводя эксперименты, вы описываете физический процесс, используя физические величины, определяя их значения. Измерить физическую величину — это значит найти опытным путём её значение, сравнив с эталоном, используя специальные технические средства.

Измерения принято подразделять на прямые и косвенные. В **прямых измерениях** значение физической величины определяется непосредственно по шкале прибора. Например, измерение длины образца с помощью линейки, или измерение периода колебаний маятника с помощью секундомера.

При **косвенных измерениях** значение физической величины определяется по формуле через другие физические величины, которые находят прямым образом. Например, для измерения скорости тела необходимо найти путь s , пройденный телом за время t , и воспользоваться формулой

$$v = \frac{s}{t}.$$

Однако истинное (точное) значение физической величины $A_{\text{ист}}$ не может быть измерено абсолютно точно. Это связано с рядом причин, в том числе с несовершенством измерительных приборов, влиянием внешних условий, различным углом зрения и т.д. Поэтому результат измерения может быть записан только приближённо, с той или иной степенью точности.

Возникающие при измерениях погрешности можно с определённой степенью условности разделить на систематические и случайные.

Систематические погрешности могут быть обусловлены, например, влиянием измерительного прибора на процесс измерения: сбит ноль прибора, слегка изогнута стрелка у стрелочного прибора, изменены физические параметры прибора и т. п. Систематические погрешности могут также возникать из-за несовершенной методики измерений, не учитывающей факторы, негативно влияющие на их точность (неучёт сил трения и сопротивления среды, изменение свойств объекта в процессе измерения и т. п.).

Если не изменять способ измерения физической величины, то при повторных измерениях в тех же условиях эта погрешность остаётся прежней.

Систематические погрешности могут быть уменьшены путём более тщательной настройки измерительных инструментов, учётом поправок, влияющих на точность измерений, использованием более совершенной методики измерений и т. п.

К **случайным погрешностям** относятся погрешности, которые неконтролируемым образом могут изменять своё значение (по величине и по знаку) при повторных измерениях в тех же условиях. При этом факторы, случайным образом влияющие на точность измерений, могут быть самыми разными: наличие в помещении конвекционных потоков воздуха, приводящих к перепадам температуры, колебаний напряжения в электрической цепи, различное время реакции человека при включении и выключении секундомера и т. п.

Основным способом борьбы со случайными погрешностями является многократное повторение измерений физической величины. При этом в качестве результата принимается среднее арифметическое значение результатов отдельных измерений.

Для количественной оценки качества измерений вводят понятия абсолютной и относительной погрешностей.

Абсолютной погрешностью ΔA физической величины называется модуль разности между истинным $A_{\text{ист}}$ и измеренным (приближённым) $A_{\text{пр}}$ значениями этой величины:

$$\Delta A = |A_{\text{ист}} - A_{\text{пр}}|.$$

Максимальная абсолютная погрешность прямых измерений равна сумме абсолютной инструментальной погрешности и абсолютной погрешности отсчёта (при отсутствии других погрешностей):

$$\Delta A = \Delta_{\text{и}} A + \Delta_0 A$$

Абсолютная инструментальная погрешность связана с конструкцией измерительного прибора. Абсолютную погрешность отсчёта в большинстве случаев принимают равной половине цены деления шкалы прибора.

Абсолютную погрешность измерения обычно округляют до одной значащей цифры (например, $0,287 \approx 0,3$ или $0,0854 \approx 0,09$). При этом значение результата измерения округляют так, чтобы оно заканчивалось цифрой того же разряда, что и значение погрешности измерения.

Пусть при многократном повторении прямых измерений некоторой величины A получены значения $A_1, A_2, A_3, \dots, A_N$. Тогда за наиболее близкое к истинному значению $A_{\text{ист}}$ принимается **среднее арифметическое значение величины $\bar{A}$** :

$$\bar{A} = \frac{A_1 + A_2 + \dots + A_N}{N}.$$

Абсолютную погрешность измерения физической величины можно оценить, используя формулу

$$\Delta A = \frac{|A_1 - \bar{A}| + |A_2 - \bar{A}| + \dots + |A_N - \bar{A}|}{N}.$$

Относительная погрешность равна отношению абсолютной погрешности измерения ΔA к измеренному значению $A_{\text{пр}}$ физической величины и обычно выражается в процентах:

$$\varepsilon = \frac{\Delta A}{A_{\text{пр}}} \cdot 100\%.$$

Относительная погрешность косвенных измерений физической величины A , определяемой через измеряемые прямым способом физические величины B и C , вычисляется по формулам, приведённым в таблице.

Формулы для вычисления относительной погрешности косвенных измерений

№	Формула для физической величины	Относительная погрешность
1	$A = B + C$	$\varepsilon = \frac{\Delta B + \Delta C}{B + C}$
2	$A = B - C$	$\varepsilon = \frac{\Delta B + \Delta C}{B - C}$
3	$A = BC$	$\varepsilon = \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta C}{C}$
4	$A = \frac{B}{C}$	$\varepsilon = \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta C}{C}$
5	$A = B\sqrt{C}$	$\varepsilon = \frac{\Delta B}{B} + \frac{1}{2} \frac{\Delta C}{C}$

Абсолютная погрешность косвенных измерений определяется по формуле

$$\Delta A = \varepsilon A_{\text{пр.}}$$

Инструментальная погрешность электроизмерительных приборов определяется их **классом точности**. Класс точности прибора — это относительная инструментальная погрешность, соответствующая максимальному значению шкалы прибора, выраженная в процентах. Так, при измерении силы тока амперметром класс точности прибора

$$\gamma = \frac{\Delta I_{\text{инст}}}{I_{\text{max}}} \cdot 100\%.$$

Например, класс точности $\gamma = 2,5$ означает относительную погрешность 2,5 %. Таким образом, инструментальная погрешность прибора

$$\Delta I_{\text{инст}} = I_{\text{max}} \frac{\gamma}{100}.$$

Инструментальная погрешность вольтметра определяется аналогично:

$$\Delta U_{\text{инст}} = U_{\text{max}} \frac{\gamma}{100}.$$

Используемые в физическом практикуме электроизмерительные приборы, как правило, подразделяются на следующие классы точности: 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4.

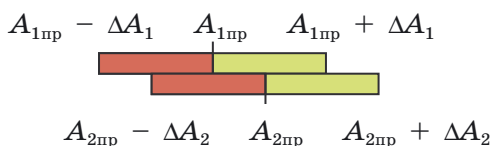
Если класс точности не указан, то инструментальная погрешность считается равной половине цены деления прибора.

Окончательный результат измерения физической величины A записывается следующим образом:

$$A = A_{\text{пр}} \pm \Delta A, \varepsilon = \dots \%$$

Для сравнения результатов нескольких измерений необходимо записать их в виде двойных неравенств:

$$A_{1\text{пр}} - \Delta A_1 < A_{1\text{пр}} < A_{1\text{пр}} + \Delta A_1; A_{2\text{пр}} - \Delta A_2 < A_{2\text{пр}} < A_{2\text{пр}} + \Delta A_2.$$



Затем эти неравенства изображаются графически. Если интервалы перекрываются, то результаты одинаковы при данной относительной погрешности измерений. Если интервалы не перекрываются, то результаты неодинаковы.

РАБОТА № 1

ЦЕЛЬ:

ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

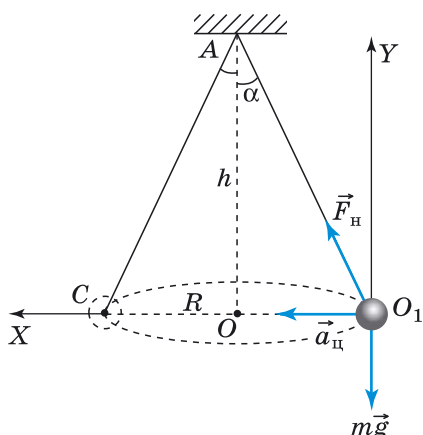
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

ИЗУЧЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛ ПО ОКРУЖНОСТИ

Определить центростремительное ускорение шарика при его равномерном движении по окружности.

Штатив с муфтой и лапкой, шарик на нити (длина нити около 60 см), весы с разновесами, динамометр, секундомер, циркуль, лист белой бумаги, рулетка.

Рассмотрим колебания конического маятника, при которых шарик, подвешенный на нити, движется по окружности заданного радиуса R . На шарик действует равнодействующая сил тяжести и натяжения нити: $\vec{F} = m\vec{g} + \vec{F}_n$, которая создаёт центростремительное ускорение a_c , направленное по радиусу к центру окружности.



Модуль центростремительного ускорения a_c можно определить, используя уравнение кинематики:

$$a_c = \frac{4\pi^2 R}{T^2}, \quad (1)$$

где T — период обращения шарика.

С другой стороны, согласно второму закону Ньютона $m\vec{g} + \vec{F}_n = m\vec{a}_c$. Запишем это уравнение в проекциях на оси O_1X и O_1Y : $F_{nX} = ma_c$; $F_{nY} - mg = 0$. Из первого уравнения находим:

$$a_c = \frac{F_{nX}}{m}. \quad (2)$$

Перепишем уравнения движения шарика в проекциях, используя тригонометрические функции угла α :

$$F_{nX} = F_n \sin \alpha = ma_c,$$

$$F_{nY} = F_n \cos \alpha = mg.$$

Из этих уравнений следует, что $\operatorname{tg} \alpha = \frac{a_c}{g}$.

Учитывая, что $\operatorname{tg} \alpha = \frac{R}{h}$, получим

$$a_c = \frac{gR}{h}. \quad (3)$$

Модуль F_{nX} можно определить другим способом. С помощью динамометра оттягиваем шарик горизонтально на расстояние, равное радиусу окружности R , и снимаем показания динамометра. При этом сила упругости пружины динамометра уравнивает горизонтальную составляющую силы натяжения нити. По формуле (2) находим центростремительное ускорение шарика.

Относительную погрешность измерения ускорения можно вычислить по формулам:

$$\varepsilon_{a1} = \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta T}{T} + \frac{\Delta T}{T}; \Delta T \approx 0,05 \text{ с};$$

$$\varepsilon_{a2} = \frac{\Delta F}{F} + \frac{\Delta m}{m}; \Delta F = 0,05 \text{ Н}; \Delta m = 1 \text{ г};$$

$$\varepsilon_{a1} = \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta h}{h}; \Delta R = \Delta h = 1 \text{ см}.$$

Абсолютная погрешность измерения ускорения a : $\Delta a = \varepsilon a$.

ХОД РАБОТЫ:

- Измерьте массу шарика с точностью до 1 г.
- Закрепите нить с привязанным к ней шариком в лапке штатива.
- Начертите на листе бумаги окружность радиусом около 20 см и измерьте её радиус с точностью до 1 см.
- Расположите лист бумаги с нарисованной окружностью так, чтобы шарик оказался над центром окружности. Держа рукой нить у точки подвеса, приведите шарик в движение так, чтобы он описывал окружность заданного радиуса.

- Измерьте время t , за которое шарик совершает 20–30 оборотов.
- Вычислите период обращения T по формуле $T = \frac{t}{N}$, где N — число оборотов шарика, и его ускорение $a_{ц1}$ по формуле (1).
- С помощью кусочка скотча прикрепите к шарiku крючок динамометра и оттяните его горизонтально на расстояние, равное радиусу окружности R . Снимите показания динамометра.
- Вычислите модуль ускорения $a_{ц2}$ шарика по формуле (2).
- Измерьте длину конического маятника от точки закрепления нити до центра шарика. Можно считать, что высота конуса приблизительно равна длине нити.
- Вычислите модуль ускорения $a_{ц3}$ шарика по формуле (3).

Измерения						Вычисления			
m , кг	R , м	N	t , с	F , Н	h , м	T , с	$a_{ц1}$, м/с ²	$a_{ц2}$, м/с ²	$a_{ц3}$, м/с ²

- Рассчитайте абсолютные и относительные погрешности измерений.
- Запишите результат в своей тетради в виде:

$$a_{ц} = a_{ц1} \pm \Delta a_{ц1}, \varepsilon_{a1} = \text{_____} \%;$$

$$a_{ц} = a_{ц2} \pm \Delta a_{ц2}, \varepsilon_{a2} = \text{_____} \%;$$

$$a_{ц} = a_{ц3} \pm \Delta a_{ц3}, \varepsilon_{a3} = \text{_____} \%.$$
- Сравните полученные значения модуля центростремительного ускорения $a_{ц1}$, $a_{ц2}$ и $a_{ц3}$ и сделайте вывод.

РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА
ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕСКОЛЬКИХ СИЛ

ЦЕЛЬ:

Определить ускорение прямолинейного равноускоренного движения тела с помощью второго закона Ньютона и законов кинематики.

ОБОРУДОВАНИЕ
И МАТЕРИАЛЫ

Деревянный брусок с крючком, набор грузов, динамометр, электронные весы до 200 г, лёгкий блок, длинная линейка, рулетка, нить, секундомер.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
СВЕДЕНИЯ

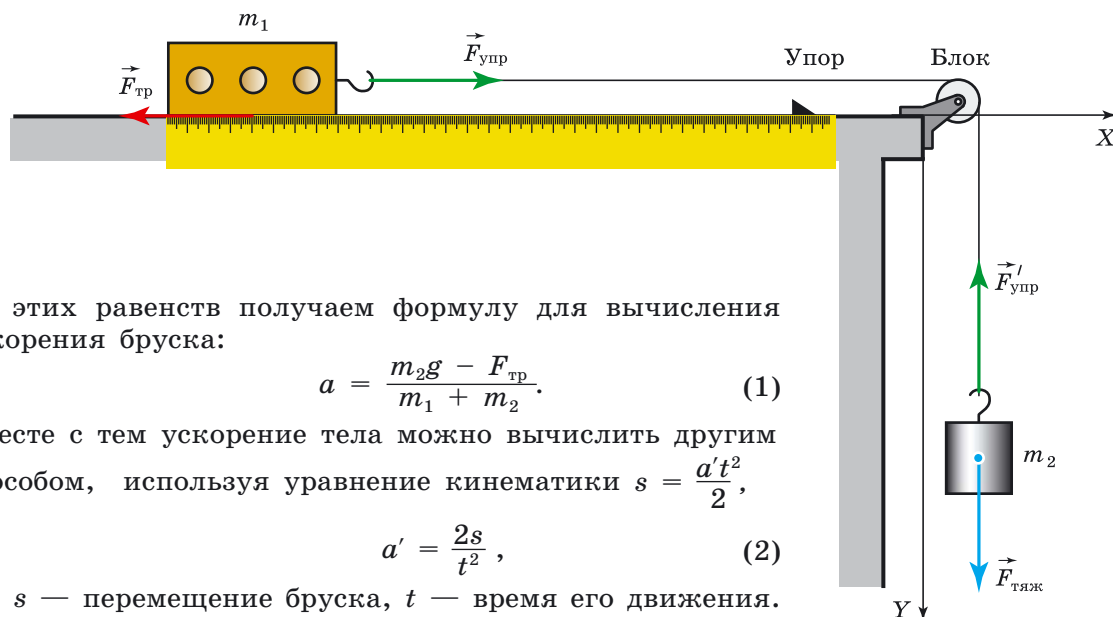
Рассмотрим ускоренное движение бруска по доске или длинной деревянной линейке с помощью установки, изображённой на рисунке.

Для бруска и груза запишем второй закон Ньютона в проекции на соответствующие координатные оси:

$$OX: F_{упр} - F_{тр} = m_1 a;$$

$$OY: m_2 g - F_{упр} = m_2 a;$$

$$F_{упр} = F'_{упр}.$$



Из этих равенств получаем формулу для вычисления ускорения бруска:

$$a = \frac{m_2 g - F_{\text{тр}}}{m_1 + m_2}. \quad (1)$$

Вместе с тем ускорение тела можно вычислить другим способом, используя уравнение кинематики $s = \frac{a' t^2}{2}$,

$$a' = \frac{2s}{t^2}, \quad (2)$$

где s — перемещение бруска, t — время его движения. Относительную погрешность измерения ускорения можно вычислить по формулам (пренебрегая погрешностью измерения массы $\Delta m = 0,1$ г):

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta F}{F_{\text{тр}}}; \Delta F = 0,05 \text{ Н};$$

$$\varepsilon_{a'} = \frac{\Delta s}{s} + \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta t}{t}; \Delta s = 0,5 \text{ см}; \Delta t = 0,1 \text{ с}.$$

Абсолютная погрешность измерения ускорения a :

$$\Delta a = \varepsilon a.$$

ХОД РАБОТЫ:

- С помощью весов измерьте массу m_1 деревянного бруска.
- Прикрепите динамометр к крючку бруска и, перемещая брусок равномерно вдоль доски (линейки), определите силу трения $F_{\text{тр}}$, равную силе натяжения пружины динамометра.
- Повторите измерения три раза и вычислите среднее значение силы трения $F_{\text{тр ср}}$.
- Соберите экспериментальную установку согласно рисунку. К краю стола прикрепите блок, через который пропустите нить. Один конец нити привяжите к бруску, а другой — к грузу. Опытным путём подберите груз такой массы m_2 , чтобы брусок двигался равноускоренно.
- Измерьте массу груза m_2 .
- Вычислите ускорение тела a_1 по формуле (1).
- Придерживая брусок левой рукой, подготовьте секундомер для измерения времени t движения бруска. Отпустите брусок и одновременно включите секундомер. Одновременно с ударом бруска об упор остановите секундомер.
- Измерьте перемещение s бруска.

- Повторите опыт три раза. Для каждого опыта вычислите ускорение a_2 по формуле (2) и рассчитайте его среднее значение $a_{2\text{ср}}$.

Номер опыта	1-й способ					2-й способ			
	m_1 , кг	m_2 , кг	$F_{\text{тр}}$, Н	$F_{\text{тр ср}}$, Н	a_1 , м/с ²	t , с	s , м	a_2 , м/с ²	$a_{2\text{ср}}$, м/с ²

- Рассчитайте абсолютные и относительные погрешности измерений.
- Запишите результат в своей тетради в виде:
 $a = a_1 \pm \Delta a_1$, $\epsilon_{a1} = \text{_____} \%$;
 $a = a_2 \pm \Delta a_2$, $\epsilon_{a2} = \text{_____} \%$.
- Согласуются ли значения ускорений, вычисленные разными способами? Какой способ оказался точнее?

РАБОТА № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ

ЦЕЛЬ:

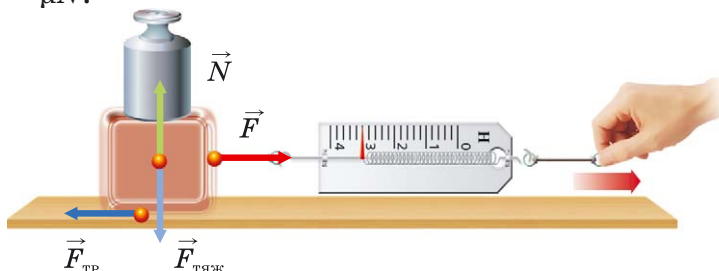
На опыте проверить, что сила трения скольжения прямо пропорциональна силе нормального давления, равной по модулю силе реакции опоры; измерить коэффициент трения скольжения дерева по дереву.

ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Динамометр, деревянный брусок, деревянная доска (деревянная поверхность) набор грузов известной массы, миллиметровая бумага.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Сила трения скольжения пропорциональна силе нормального давления, модуль которой равен модулю силы реакции опоры:
 $F_{\text{тр}} = \mu N$.



Измерив с помощью динамометра силу трения и вес бруска, можно вычислить коэффициент трения скольжения по формуле:

$$\mu = \frac{F_{\text{тр}}}{N}.$$

Относительную погрешность измерения коэффициента трения можно вычислить по формуле:

$$\epsilon_{\mu} = \frac{\Delta F}{F_{\text{тр}}} + \frac{\Delta N}{N}; \Delta F = \Delta N = 0,05 \text{ Н}.$$

Абсолютная погрешность измерения μ : $\Delta \mu = \epsilon_{\mu} \mu$.

ХОД РАБОТЫ:

- С помощью динамометра измерьте вес P деревянного бруска.
- Положите брусок на горизонтальную деревянную поверхность и, прикрепив к нему динамометр, равномерно перемещайте вдоль поверхности. Динамометр показывает силу, действующую на брусок, которая по модулю равна силе трения скольжения $F_{\text{тр}}$.
- Поставьте на брусок груз известной массы и измерьте силу трения скольжения ещё раз.
- Повторите опыт, поставив на брусок дополнительные 2, а затем 3 груза известной массы.
- Сделайте рисунок, обозначив на нём все силы, действующие на брусок.
- Вычислите силы реакции опоры N , действующие на брусок в каждом случае: $N = P + P_{\text{гр}}$, где $P_{\text{гр}}$ — вес грузов.
- Вычислите коэффициент трения скольжения μ для каждого случая.
- По экспериментальным точкам постройте график зависимости силы трения скольжения от силы реакции опоры $F_{\text{тр}}(N)$.
- По графику определите среднее значение коэффициента трения скольжения $\mu_{\text{ср}}$.

Измерения				Вычисления		
Номер опыта	P , Н	Вес грузов $P_{\text{гр}}$, Н	$F_{\text{тр}}$, Н	N , Н	μ	$\mu_{\text{ср}}$

- Рассчитайте абсолютные и относительные погрешности измерений в каждом из опытов. В каком опыте погрешность измерения максимальна?
- Запишите результат в виде: $\mu = \mu_{\text{ср}} \pm \Delta\mu$, $\varepsilon_{\mu} = \text{_____}\%$.
- Найдите табличное значение коэффициента трения скольжения дерева по дереву и сравните его с полученным вами в лабораторной работе. Сделайте выводы.

РАБОТА № 4

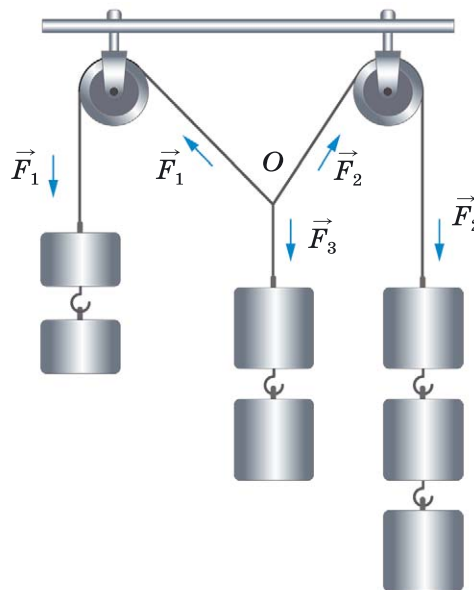
ЦЕЛЬ:

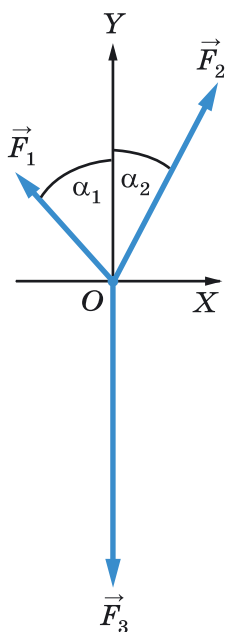
ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

ИЗУЧЕНИЕ УСЛОВИЙ РАВНОВЕСИЯ ТЕЛ

Изучить условия равновесия невращающегося тела, к которому приложены несколько сил, и условия равновесия тела с закреплённой осью вращения.

Штатив, набор грузов, 2 блока, динамометр, линейка, транспортир, рычаг с балансиrom.



ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
СВЕДЕНИЯ

Рассмотрим пример равновесия тела под действием трёх сил. Через два блока перекинем нить, к концам и центру которой подвесим грузы. Если каждый из грузов меньше суммы двух других, то через некоторое время система придёт в равновесие. При этом равнодействующая сил, действующих на точку пересечения нитей (точку O), равна нулю:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = 0.$$

Проведём оси координат и обозначим углы между силами $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ и осью OY как α_1 и α_2 . Запишем проекции сил на оси OX и OY .

$$OX: -F_1 \sin \alpha_1 + F_2 \sin \alpha_2 = 0,$$

$$OY: F_1 \cos \alpha_1 + F_2 \cos \alpha_2 - F_3 = 0.$$

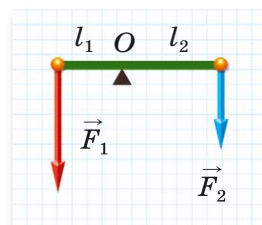
Учитывая, что силы F_1 , F_2 и F_3 равны силам тяжести грузов, и измерив углы α_1 и α_2 , можно убедиться, что условие равновесия выполняется.

При равновесии твёрдого тела, способного вращаться вокруг закреплённой оси, алгебраическая сумма моментов действующих на него сил относительно этой оси равна нулю.

Так, рычаг будет находиться в равновесии, если выполняется условие:

$$M_1 + M_2 = 0 \text{ или } F_1 l_1 - F_2 l_2 = 0,$$

где F_1 и F_2 — силы, действующие на рычаг, l_1 и l_2 — плечи этих сил, $M_1 = F_1 l_1$, $M_2 = F_2 l_2$ — моменты сил.



ХОД РАБОТЫ:

- Соберите установку, состоящую из двух блоков, через которые перекинута нить. К концам нити подвесьте по одному грузу и уравновесьте систему, прикрепив один груз к нити посередине.
- Подождите, пока система придёт в равновесие, и измерьте углы α_1 и α_2 , образованные силами F_1 и F_2 и вертикалью.
- К концам нити подвесьте ещё по два груза. Подождите, пока система придёт в равновесие, и измерьте углы α_1 и α_2 .
- Запишите массы m_1 , m_2 и m_3 подвешенных грузов и вычислите модули сил F_1 , F_2 и F_3 в каждом из опытов.
- Вычислите сумму проекций сил на оси OX и OY .
- Сделайте вывод о выполнении условия равновесия твёрдого тела.

Измерения						Вычисления				
Номер опыта	m_1 , кг	m_2 , кг	m_3 , кг	α_1	α_2	F_1 , Н	F_2 , Н	F_3 , Н	$F_{1X} + F_{2X} + F_{3X}$	$F_{1Y} + F_{2Y} + F_{3Y}$

- Уравновесьте рычаг, вращая гайки на его концах так, чтобы он расположился горизонтально.

- Подвесьте два груза на левой части рычага так, чтобы расстояние от оси вращения до точек подвесов грузов было в пределах от 10 до 15 см.
- Опытным путём установите, на каком расстоянии вправо от оси вращения нужно подвесить один груз, чтобы рычаг уравновесился.
- Определите силы и измерьте плечи сил, действующих на рычаг.
- Повторите опыт, подвешивая с правой стороны рычага два и три груза. Определите силы и измерьте плечи сил, действующих на рычаг.
- Вычислите равнодействующую этих сил.
- Вычислите алгебраическую сумму моментов сил, действующих на рычаг.

Измерения					Вычисления	
Номер опыта	F_1 , Н	F_2 , Н	l_1 , м	l_2 , м	$\vec{F}_1 + \vec{F}_2$	$M_1 + M_2$

- Сделайте вывод о выполнении условий равновесия твёрдого тела с закреплённой осью вращения.

РАБОТА № 5

ЦЕЛЬ:

ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЗАКОНА ГЕЙ-ЛЮССАКА

На опыте проверить выполнение закона Гей-Люссака.

Стеклянная трубка, закрытая с одного конца, пробка (или пластилин), цилиндрический сосуд с горячей водой, термометр, линейка, стакан с водой комнатной температуры.

Чтобы проверить выполнение закона Гей-Люссака, необходимо исследовать зависимость объёма газа от температуры при неизменном давлении. Для двух состояний газа должно выполняться

равенство $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$, или $\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$. Так как площадь поперечного

сечения трубки в опыте постоянна по всей длине, то для сравнения объёмов воздуха достаточно измерить высоту воздушного

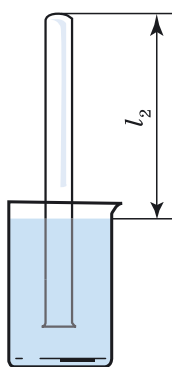
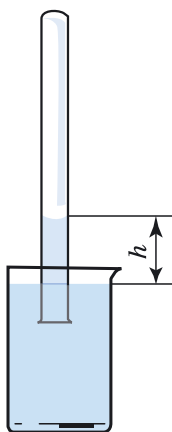
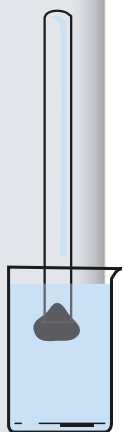
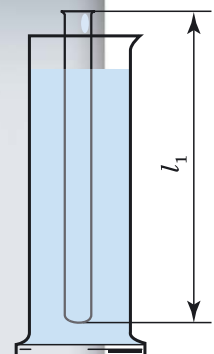
столба в трубке: $\frac{V_1}{V_2} = \frac{Sl_1}{Sl_2} = \frac{l_1}{l_2}$.

В качестве газа используется воздух в трубке.

В сосуд с горячей водой поместим трубку открытым концом вверх. Воздух в трубке нагреется. Это будет первое состояние газа. В этом случае давление воздуха равно атмосферному, температура воздуха T_1 равна температуре горячей воды, а объём воздуха V_1 равен объёму стеклянной трубки.

Чтобы масса воздуха в трубке не изменилась, закроем её пробкой или пластилином.

Затем воздух в трубке переведём во второе состояние. Трубку пробкой вниз опустим в сосуд с водой комнатной температуры.



Не вынимая трубку из воды, вынем пробку. По мере охлаждения воздуха в трубке его давление будет понижаться, и вода будет подниматься вверх по трубке. Чтобы давление воздуха в трубке во втором состоянии было равно давлению в первом состоянии, т. е. атмосферному давлению, изменим положение трубки так, чтобы уровни воды в трубке и в сосуде совпадали. В этом состоянии температура воздуха T_2 равна температуре окружающего воздуха, а объём воздуха V_2 соответствует высоте воздушного столба l_2 в трубке.

Относительные погрешности измерений вычисляются по формулам:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l}{l_1} + \frac{\Delta l}{l_2}; \Delta l = 0,5 \text{ см}; \quad \varepsilon_2 = \frac{\Delta T}{T_1} + \frac{\Delta T}{T_2}; \Delta T = 2 \text{ К}.$$

Абсолютные погрешности:

$$\Delta_1 = \frac{l_1}{l_2} \varepsilon_1 \text{ и } \Delta_2 = \frac{T_1}{T_2} \varepsilon_2.$$

ХОД РАБОТЫ:

- Измерьте длину l_1 стеклянной трубки.
- Измерьте температуру T_1 горячей воды.
- В цилиндр с горячей водой поместите трубку открытым концом вверх. Дайте воздуху в трубке нагреться, а затем закройте трубку пробкой.
- Выньте трубку из цилиндра с водой и опустите её пробкой вниз в стакан с водой комнатной температуры. Не вынимая трубку из воды, выньте пробку. Подождите, пока воздух в трубке охладится. Измените положение трубки так, чтобы уровни воды в трубке и в сосуде совпадали.
- Измерьте высоту l_2 воздушного столба в трубке.
- Измерьте температуру T_2 окружающего воздуха.
- Выразите измеренные температуры в кельвинах и вычислите отношения $\frac{l_1}{l_2}$ и $\frac{T_1}{T_2}$.

Измерения				Вычисления			
l_1 , мм	t_1 , °C	l_2 , мм	t_2 , °C	T_1 , К	T_2 , К	l_1/l_2	T_1/T_2

- Вычислите относительные и абсолютные погрешности измерений отношений.

- Сравните отношения $\frac{l_1}{l_2}$ и $\frac{T_1}{T_2}$ с учётом погрешностей:

$$\frac{l_1}{l_2} \pm \Delta_1 \text{ и } \frac{T_1}{T_2} \pm \Delta_2.$$

- Сделайте вывод, выполняется ли закон Гей-Люссака в данном опыте.

РАБОТА № 6

ЦЕЛЬ:

ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ ПЛАВЛЕНИЯ ЛЬДА

Определить удельную теплоту плавления льда.

Калориметр, термометр, измерительный цилиндр (мензурка), сосуд с водой и тающим льдом, сосуд с горячей водой (температурой 60–70 °С), салфетки или фильтровальная бумага.

Во внутренний стакан калориметра наливается горячая вода массой m_1 температурой t_1 и опускается тающий лёд массой m_2 температурой $t_2 = 0$ °С. Спустя некоторое время лёд растает и в калориметре установится температура t_3 . Если температура t_3 будет равна температуре окружающего воздуха, то начальное и конечное значения температуры калориметра одинаковы, и, следовательно, количество теплоты, полученное и отданное калориметром, в расчётах можно не учитывать.

Количество теплоты, отданное горячей водой при охлаждении до температуры t_3 , равно

$$Q_1 = cm_1(t_3 - t_1).$$

Количество теплоты, необходимое для плавления льда, равно

$$Q_2 = \lambda m_2.$$

Количество теплоты, необходимое для нагревания воды, образовавшейся из растаявшего льда, до температуры t_3 , равно

$$Q_3 = cm_2(t_3 - t_2).$$

Согласно уравнению теплового баланса

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = 0;$$

$$cm_1(t_3 - t_1) + \lambda m_2 + cm_2(t_3 - t_2) = 0.$$

Тогда для удельной теплоты плавления льда можно получить следующую формулу:

$$\lambda = \frac{cm_1(t_1 - t_3) - cm_2(t_3 - t_2)}{m_2}.$$

Абсолютная погрешность измерения удельной теплоёмкости льда:

$$\Delta\lambda = \Delta a + \Delta b, \text{ где } a = \frac{m_1}{m_2}c(t_1 - t_3), \text{ } b = c(t_3 - t_2).$$

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta m_1}{m_1} + \frac{\Delta m_2}{m_2} + \frac{2\Delta t}{t_1 - t_3}; \varepsilon_b = \frac{2\Delta t}{t_3 - t_2}; \Delta t = 1 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\Delta a = \varepsilon_a a; \Delta b = \varepsilon_b b.$$

ХОД РАБОТЫ:

- Подержите лёд некоторое время при комнатной температуре, чтобы он начал таять и появилась вода. Температура льда при этом станет равна $t_2 = 0$ °С.
- Измерьте температуру воздуха в классе.
- Налейте 100–150 мл горячей воды в измерительный цилиндр. Измерьте её объём V_1 . Перелейте воду из мензурки во внутренний стакан калориметра и измерьте её температуру t_1 .
- Возьмите кусочек льда, осушите его салфеткой или фильтровальной бумагой и осторожно опустите в калориметр с горячей водой. Аккуратно перемешивайте воду в калориметре кончиком термометра и следите за изме-

нением температуры. После того как кусочек льда полностью расплавится, опустите второй кусок, предварительно осушив его. Лёд нужно добавлять до тех пор, пока температура воды в калориметре не станет приблизительно равна температуре окружающего воздуха.

- Измерьте установившуюся температуру t_3 воды в калориметре.
- Перелейте воду из калориметра в измерительный цилиндр и измерьте её объём V_3 .
- Вычислите объём воды, образовавшейся из растаявшего льда, как разность объёмов всей воды и горячей воды: $V_2 = V_3 - V_1$.
- Зная плотность воды ($\rho_v = 1000 \text{ кг/м}^3$), вычислите массы горячей воды m_1 и льда m_2 : $m = \rho_v V$.
- Вычислите удельную теплоту плавления льда λ (удельная теплоёмкость воды $c = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$).

Измерения					Вычисления			
$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$t_3, ^\circ\text{C}$	$V_1, \text{м}^3$	$V_3, \text{м}^3$	$V_2, \text{м}^3$	$m_1, \text{кг}$	$m_2, \text{кг}$	$\lambda \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$

- Оцените погрешности измерений и вычислений.
- Сравните полученное значение удельной теплоты плавления льда с табличным. Они должны совпадать в пределах погрешности.

РАБОТА № 7

ЦЕЛЬ:

ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЁМКОСТИ ПЛОСКОГО КОНДЕНСАТОРА

Исследовать, от чего зависит электроёмкость плоского конденсатора и определить эту электроёмкость.

Электромметр, металлические пластины, диэлектрические пластины, соединительные провода, эбонитовая или стеклянная палочка, шерстяная или шёлковая ткань, линейка.

Измерив расстояние между пластинами, площадь одной из пластин, и зная диэлектрическую проницаемость диэлектрика, можно вычислить электроёмкость плоского конденсатора по формуле:

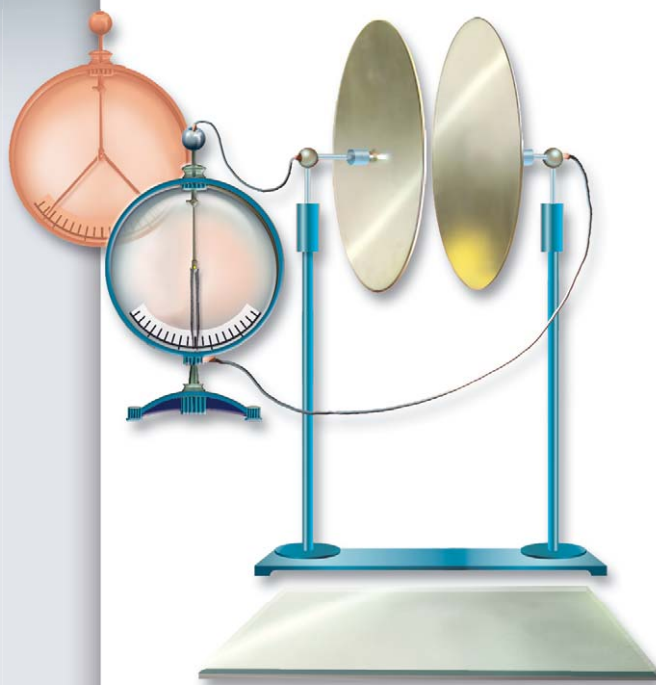
$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}.$$

Для пластин конденсатора, имеющих круглую форму, площадь пластины вычисляется по формуле $S = \pi D^2/4$, где D — диаметр пластины.

Относительную погрешность измерения электроёмкости можно вычислить по формуле:

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta d}{d}, \text{ где } \Delta D = \Delta d = 1 \text{ мм.}$$

Абсолютная погрешность измерения C : $\Delta C = \varepsilon_c C$.



ХОД РАБОТЫ:

- Соедините корпус и стержень электрометра с пластинами конденсатора, как показано на рисунке.
- Расположите пластины конденсатора на расстоянии примерно 5 мм друг от друга, чтобы их центры находились на одной прямой.
- Наэлектризуйте эбонитовую или стеклянную палочку трением о ткань. Зарядите конденсатор, прикоснувшись заряженной палочкой к стержню электрометра. Электрометр будет показывать разность потенциалов между пластинами конденсатора.
- Измените расстояние между пластинами. По изменению показаний электрометра сделайте вывод о том, как изменяется электроёмкость конденсатора.
- При неизменном расстоянии между пластинами (примерно 5 мм) сдвиньте одну из пластин конденсатора относительно другой, тем самым изменив площадь взаимного перекрытия пластин. По изменению показаний электрометра сделайте вывод о том, как изменяется электроёмкость конденсатора.
- В пространство между пластинами введите диэлектрическую пластину. По изменению показаний электрометра сделайте вывод о том, как изменяется электроёмкость конденсатора.

	Изменение	Разность потенциалов между пластинами (увеличивается/уменьшается)	Электроёмкость конденсатора (увеличивается/уменьшается)	Вывод
Расстояние между пластинами	Увеличивается			
	Уменьшается			
Площадь перекрытия пластин	Увеличивается			
	Уменьшается			
Диэлектрическая проницаемость среды	Увеличивается			
	Уменьшается			

- Измерьте параметры металлической пластины и вычислите площадь S одной пластины.
- Измерьте расстояние d между пластинами.

- Запишите значение диэлектрической проницаемости ϵ диэлектрика, используемого в вашем опыте.
- Вычислите электроёмкость конденсатора C_1 без диэлектрика и C_2 с диэлектриком.

Размеры пластины	S , м ²	d , м	ϵ	S_1 , Ф	S_2 , Ф

- Вычислите погрешности измерений и запишите результат с учётом погрешности.
- Сделайте выводы.

РАБОТА № 8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭДС
И ВНУТРЕННЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКА ТОКА

ЦЕЛЬ:

Измерить ЭДС источника тока и определить его внутреннее сопротивление.

ОБОРУДОВАНИЕ
И МАТЕРИАЛЫ

Источник постоянного тока (плоская батарейка), вольтметр, амперметр, реостат, ключ, соединительные провода.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
СВЕДЕНИЯ

Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из источника постоянного тока, реостата, амперметра, вольтметра и ключа. При разомкнутом ключе источник тока замкнут на вольтметр, сопротивление которого много больше внутреннего сопротивления источника тока ($R_B \gg r$). Из закона Ома для полной цепи

$$\mathcal{E} = IR_B + Ir.$$

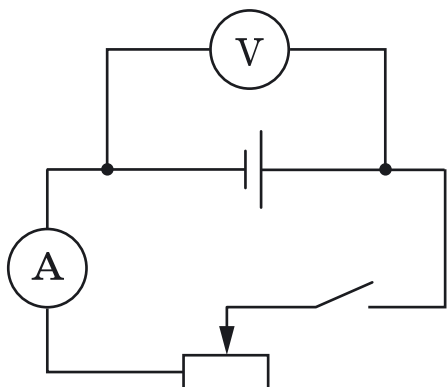
Ток I в цепи настолько мал, что можно пренебречь значением падения напряжения на внутреннем сопротивлении источника тока $Ir \approx 0$. Тогда ЭДС источника тока можно принять равной напряжению на его зажимах $\mathcal{E} \approx IR_B = U$.

Если ключ замкнуть, вольтметр покажет падение напряжения на сопротивлении реостата R : $U_1 = I_1 R$. Тогда по закону Ома для полной цепи $\mathcal{E} = U_1 + I_1 r$. Отсюда находим внутреннее сопротивление источника тока:

$$r = \frac{\mathcal{E} - U_1}{I_1} = \frac{U - U_1}{I_1}. \quad (1)$$

Абсолютная погрешность измерения ЭДС равна погрешности измерения напряжения: $\Delta \mathcal{E} = \Delta U$.

Относительная погрешность измерения внутреннего сопротивления $\epsilon_r = \frac{\Delta \mathcal{E} + \Delta U}{\mathcal{E} - U_1} + \frac{\Delta I_1}{I_1}$, абсолютная погрешность $\Delta r = r \epsilon_r$.



ЭДС источника тока и его внутреннее сопротивление можно определить ещё одним способом. Если в данном опыте (для замкнутого ключа) измерить силу тока и напряжение для двух различных положений ползунка реостата, то получим систему из двух уравнений:

$$\begin{cases} \mathcal{E} = I_1 R_1 + I_1 r, \\ \mathcal{E} = I_2 R_2 + I_2 r \end{cases}, \text{ где } I_1 R_1 = U_1, I_2 R_2 = U_2.$$

Решив эту систему уравнений, получим выражения для ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока:

$$\mathcal{E} = \frac{I_1 U_2 - I_2 U_1}{I_1 - I_2}; \quad r = \frac{U_2 - U_1}{I_1 - I_2}. \quad (2)$$

Для упрощения погрешности измерения ЭДС и внутреннего сопротивления источника, вычисленных по формулам (2), будем считать такими же, как в первом опыте.

ХОД РАБОТЫ:

- Соберите электрическую цепь по схеме, изображённой на рисунке. Убедитесь в правильности подключения амперметра и вольтметра.
- Измерьте ЭДС источника тока $\mathcal{E}_1$.
- Установите ползунок реостата в среднее положение и снимите показания амперметра I_1 и вольтметра U_1 при замкнутом ключе.
- Вычислите значение внутреннего сопротивления источника тока r_1 по формуле (1).
- Измените положение ползунка реостата, установив его на максимальное значение, и снимите показания амперметра I_2 и вольтметра U_2 при замкнутом ключе.
- Вычислите значения ЭДС $\mathcal{E}_2$ и внутреннего сопротивления источника тока r_2 по формулам (2).

Измерения					Вычисления		
$\mathcal{E}_1$, В	I_1 , А	U_1 , В	I_2 , А	U_2 , В	r_1 , Ом	$\mathcal{E}_2$, В	r_2 , Ом

- Рассчитайте абсолютные и относительные погрешности измерений. Абсолютные и относительные погрешности измерения силы тока и напряжения примите равными инструментальным погрешностям приборов с учётом их классов точности: $\Delta I = \Delta I_{\text{инст}}$, $\Delta U = \Delta U_{\text{инст}}$.
- Запишите результат в своей тетради в виде:

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= \mathcal{E}_1 \pm \Delta \mathcal{E}, & \mathcal{E} &= \mathcal{E}_2 \pm \Delta \mathcal{E}; \\ r &= r_1 \pm \Delta r, & r &= r_2 \pm \Delta r. \end{aligned}$$

Сравните значения $\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_2$, полученные в результате прямых измерений и вычисленные по формуле. Сравните значения r_1 и r_2 .

ПРЕДМЕТНО-ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Абсолютно твёрдое тело 56

Агрегатное состояние
вещества 98, 120

Атом 90

Вес тела 48

Взаимодействие 42

— молекул 93

— электромагнитное 150

Влажность 124

Время 11

Давление газа 100

Движение броуновское 92

— искусственных спутников
Земли 47

— механическое 12

— неравномерное 20

— по инерции 38

— по окружности 30

— поступательное 12

— равнозамедленное 22

— равномерное прямо-
линейное 16

— равнопеременное 22

— равноускоренное 22

— реактивное 82

— способы описания 14

— тела, брошенного
вертикально вверх 26

— тела, брошенного
под углом к горизонту 27

Десублимация 120

Диффузия 92

Диэлектрик 159

Диэлектрическая

проницаемость 159

Закон Авогадро 113

— Бойля—Мариотта 110

— второй Ньютона 41, 79

— второй термодинамики 140

— всемирного тяготения 45

— Гей—Люссака 109

— Джоуля—Ленца 178

— Кулона 152

— Ома 172, 175

— первый Ньютона 39

— первый термодинамики 138

— постоянных отношений 91

— сохранения импульса 81

— сохранения энергии 74, 77

— третий Ньютона 43

— Шарля 111

— электролиза 187

Заряд 150

Идеальный газ 100

Импульс 78

Инертность 41

Ионизация газов 188

Испарение 122

Кипение 123

Количество вещества 97

— теплоты 134

Конденсатор 162

Конденсация 120, 122

Кристаллизация 120

Материальная точка 12, 78

Молекула 90

Молярная масса 97

Мощность 66

— электрического тока 179

Напряжение 161, 172

Напряжённость 156

Насыщенный пар 123

Опыт Кулона 152

— Штерна 104

Парообразование 120

Перемещение 12

— сложение 18

— при равнопеременном
движении 24

Период 31

Плавление 120

Плазма 121

Плечо силы 58

Поле электрическое 154

Полупроводник 192

Поляризация диэлектриков 159

Постоянная Авогадро 97

— Больцмана 113, 114

— гравитационная 45

— универсальная газовая 112

— электрическая 153

Потенциал 161

Правило моментов 59

Принцип относительности

Галилея 39

— суперпозиции полей 157

Проводник 158

ПРЕДМЕТНО-ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Пространство 10
 Процесс адиабатный 139
 — изобарный 108, 139
 — изотермический 110, 139
 — изохорный 110, 139
 Путь 12
Работа 64, 68
 — газа 136
 — силы трения 76
 — силы тяжести 70
 — силы упругости 71
 — сторонних сил 175
 — электрического поля 160
 — электрического тока 178
 Равновесие невращающегося тела 57
 — тела с закреплённой осью вращения 58
 — тепловое 106
 Разряд несамостоятельный 188
 — самостоятельный 189
Сверхпроводимость 185
 Свободное падение 26
 Сила 36, 40
 — всемирного тяготения 44
 — сторонняя 174
 — тока 171, 172
 — трения 50
 — тяжести 46, 48
 — электродвижущая 174
 Система координат 10
 — отсчёта 10, 14, 38, 72
 Скорость линейная 31
 — мгновенная 20
 — молекул 100, 105
 — относительная 19
 — первая космическая 47
 — равномерного прямолинейного движения 16
 — равнопеременного движения 22
 — сложение 19
 — средняя квадратичная 115
 — средняя путевая 20
 — угловая 31
 — упорядоченного движения электронов 184
 Соединение конденсаторов 165
 — проводников 176
 Сопротивление проводника 172
 Сублимация 120

Тело аморфное 127
 — кристаллическое 126
 — макроскопическое 94
 — микроскопическое 94
 — отсчёта 10
 Температура 106
 — абсолютная 108, 114
 Теория относительности 11
 Термодинамика 132
 Термометр 107
 Термоэлектронная эмиссия 190
 Траектория 12

Уравнение движения 16
 — Клапейрона 112
 — Менделеева—Клапейрона 113
 — молекулярно-кинетической теории 102
 — теплового баланса 139
 Ускорение 22, 40
 — свободного падения 46
 — среднее 25

Центр масс 56
 Цикл Карно 143

Частота 31

Электризация 150
 Электрическая ёмкость 162
 Электрический ток 170
 — в вакууме 190
 — в газах 188
 — в металлах 184
 — в полупроводниках 192
 — в электролитах 186
 Электролиз 187
 Электролитическая диссоциация 186
 Энергия 68
 — внутренняя 132
 — заряженного конденсатора 164
 — кинетическая 68, 72
 — потенциальная 69, 70, 161
 — электростатическая 160

Учебное издание

Серия «Сферы»

Белага Виктория Владимировна
Ломаченков Иван Алексеевич
Панебратцев Юрий Анатольевич

Физика

10 класс

Базовый уровень

Учебник

Центр развития углублённого и профильного образования,
функциональной грамотности, технологии и ИКТ-компетенций

Ответственный за выпуск *Н. В. Мелешко*

Редактор *В.В. Жумаев*

Художественный редактор *С.Г. Куркина*

Компьютерная вёрстка *Э.В. Ленчевской, Д.Ю. Герасимова*

Художественное оформление *О.В. Поповича, С.В. Ермолина,*

Э.В. Ленчевской, С.Г. Куркиной, И.В. Шорниковой,

С.Н. Аминевой, А.Г. Куркина, К.С. Бихтемирова, А.Г. Шишова

Дизайн обложки *О.В. Поповича*

Технический редактор *Н.Н. Бажанова*

Корректоры *Е.В. Барановская, М. Г. Волкова*

Подписано в печать 15.02.2022. Формат 84×108/16. Гарнитура SchoolBookCSanPin.

Усл. печ. л. 23,52. Уч.-изд. л. 19,22. Тираж экз. Заказ № .

Акционерное общество «Издательство «Просвещение».

Российская Федерация, 127473, г. Москва, ул. Краснопролетарская, д. 16, стр. 3, этаж 4,
помещение I.

Адрес электронной почты «Горячей линии» — vopros@prosv.ru.